

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ivan Perković**

U Zagrebu, 2014

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić, dipl. ing.

Student:

Ivan Perković

0035164366

U Zagrebu, ožujak 2014.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru Prof. dr. sc. Zoranu Luliću na stručnom vođenju tijekom izrade rada.

Također bih se želio posebno zahvaliti dr. sc. Goranu Šagiju na savjetima i ustupljenoj literaturi koja mi je bila od velike koristi tijekom izrade rada.

Ivan Perković



## Sadržaj

Popis slika.....	vii
Popis tablica.....	xi
Popis oznaka.....	xii
Sažetak.....	xiii
1. Uvod.....	1
2. O natjecanju SAE Formula Student.....	2
2.1. Discipline natjecanja .....	2
2.2. Izvadak iz pravilnika (2014 Formula SAE Rules) .....	5
2.2.1. D dio pravilnika (2014 Formula SAE Rules) .....	5
3. Ovjes vozila .....	14
3.1. Geometrijske značajke ovjesa .....	14
3.1.1. Trenutno središte rotacije geometrije ovjesa .....	15
3.1.2. Prednji pogled na geometriju ovjesa .....	16
3.1.3. Bočni pogled na geometriju ovjesa .....	19
3.2. Zahtjevi za konstruiranje ovjesa.....	22
3.2.1. Grafička metoda .....	26
4. Programski paketi za analizu kinematike i dinamike vozila.....	27
4.1. CarSIM .....	28
4.1.1. Izrada matematičkog modela.....	28
4.1.2. Sučelje aplikacije CarSIM.....	28
4.1.3. Rezultati dobiveni simulacijom u CarSIM-u.....	30
4.2. Lotus Suspension Analysis.....	35
5. Izrada simulacijskog modela Formule Student.....	38
5.1. Mjerenje težišta bolid Formule student .....	39
5.1.1. Proračun težišta.....	40
5.2. Izrada modela u aplikaciji Lotus Suspension Analysis .....	44
5.3. Izrada modela u aplikaciji CarSIM.....	51
5.3.1. Vozilo (engl. <i>Vehicle body</i> ).....	52
5.3.2. Motor i prijenos snage (engl. <i>System</i> ) .....	54
5.3.3. Upravljanje (engl. <i>Steering</i> ) .....	55
5.3.4. Kinematika kotača .....	57
5.3.5. Kočnice (engl. <i>Brake system(4 wheel system)</i> ) .....	58
5.3.6. Pneumatici .....	59

6. Usporedba modela formule sa različitim geometrijskim značajkama ovjesa.....	61
6.1. Model Arctos 1.0 .....	61
6.2. Model Arctos 3.0 .....	69
6.3. Usporedba modela .....	76
7. Rezultati simulacije modela.....	78
7.1. Procedura "ubrzavanje i usporavanje" .....	78
7.2. Procedura "Autokros" .....	81
7.3. Procedura "Osmica" .....	85
7.4. Procedura "100-0 km/h" .....	88
7.5. Rezultati.....	90
8. Zaključak .....	91
9. Literatura.....	92
PRILOZI.....	93
Proračun težišta vozila .....	94

## Popis slika

Slika 1. Pregled curenja tekućina (engl. tilt table test) .....	3
Slika 2. Poligon testa bočnog ubrzanja.....	4
Slika 3. Dvostruke poprečne vodilice[3] .....	14
Slika 4. Stupnjevi slobode gibanja vozila.....	15
Slika 5. Trenutno središte rotacije[3] .....	16
Slika 6. Konstruiranje centra valjalja vozila.....	17
Slika 7. Promjena nagiba kotača.....	18
Slika 8. Bočni nagib kotača[7] .....	18
Slika 9. Polumjer zakreta kotača[7].....	19
Slika 10. Anti-dive.....	20
Slika 11. Određivanje iznosa anti-značajki .....	21
Slika 12. Anti-squat .....	21
Slika 13. Promjena međuosovinskog razmaka .....	22
Slika 14. Uzdužni nagib osi zakretanja kotača[7] .....	22
Slika 15. Parametri ovjesa .....	23
Slika 16. Određivanje pozicije spone .....	24
Slika 17. Usmjerenost kotača .....	25
Slika 18. Under Ackermann[10].....	26
Slika 19. Grafička metoda crtanja točaka ovjesa.....	27
Slika 20. Izgled sučelja aplikacije .....	29
Slika 21. Slijed odabira baze podataka .....	29
Slika 22. Primjer grafičkog prikaza rezultata .....	30
Slika 23. prikaz odstupanja vozila od zadane putanje .....	31
Slika 24. Prikaz bočnog ubrzanja .....	31
Slika 25. Prikaz promjene vertikalne sile .....	32
Slika 26. Prikaz bočnog klizanja svakog kotača posebno .....	32
Slika 27. Prikaz kuta zakreta upravljača.....	33
Slika 28. Prikaz kuta zakretanja prednjih kotača.....	33
Slika 29. Prikaz animacije .....	34
Slika 30. Početni zaslon.....	35
Slika 31. Prikaz vrijednosti za određenu značajku .....	36
Slika 32. Zakretanje vozila oko uzdužne osi .....	37
Slika 33. Prikaz zakretanja kotača .....	37

Slika 34. Šasija bolida .....	38
Slika 35. Vaga Intercomp Racing 500[4] .....	39
Slika 36. Libela i magnetni tračni metar[5] .....	40
Slika 37. Karakteristike libele[5] .....	40
Slika 38. Bolid postavljen na horizontalnu podlogu .....	41
Slika 39. Položaj x i y koordinate težišta praznog vozila[3] .....	43
Slika 40. Položaj z-koordinate težišta praznog vozila[3] .....	43
Slika 41. Položaj x i y-koordinate ovješene mase vozila[3] .....	43
Slika 42. Glavno sučelje aplikacije LSA .....	45
Slika 43. Alati LSA .....	45
Slika 44. Izbornik za odabir vrste ovjesa .....	46
Slika 45. Izbornik za unos dodatnih parametara .....	46
Slika 46. Izbornik za definiranje pneumatika .....	47
Slika 47. Izbornik za definiranje karakterističnih točaka ovjesa .....	47
Slika 48. Izbornik za definiranje opruge .....	48
Slika 49. Izbornik za definiranje amortizera .....	48
Slika 50. Izbornik za definiranje statičkih karakteristika kotača .....	49
Slika 51. Model bolida u LSA .....	49
Slika 52. Dijagrami promjene bočnog nagiba kotača .....	50
Slika 53. Različita definicija koordinatnih sustava u programskim paketima .....	51
Slika 54. Glavno sučelje programa CarSim .....	51
Slika 55. Prozor za definiranje korištenog modela .....	52
Slika 56. Prozor definiranja postavki vozila .....	52
Slika 57. Vaganje bolida FSB Arctos u svrhu određivanja visine težišta te udaljenosti od prednje osovine .....	53
Slika 58. Prikaz sučelja za definiranje mase i centra gravitacije vozila kao i pripadajućih momenata inercije oko odgovarajućih osi .....	53
Slika 59. Prikaz sučelja za definiranje prijenosa snage modela .....	54
Slika 60. Mapa motora .....	55
Slika 61. Prikaz prijenosnih omjera mjenjača .....	55
Slika 62. Karakteristike upravljanja na prednjoj osovini .....	55
Slika 63. Prikaz koordinatnog sustava kotača i položaja značajki .....	56
Slika 64. Prikaz predznaka pomaka kotača u ovisnosti i položaju letve upravljača .....	57
Slika 65. Kinematika kotača .....	57
Slika 66. Prikaz smjera i predznaka djelovanja promjene parametara .....	58



Slika 67. Izbornik kočionog sustava.....	59
Slika 68. Izbornik za definiranje pneumatika.....	60
Slika 69. Izbornik za definiranje promjene polumjera kotača uslijed opterećenja.....	60
Slika 70. Prednji ovjes modela Arctos 1.0.....	62
Slika 71. Promjena geometrijskih značajki prednjeg ovjesa .....	62
Slika 72. Stražnji ovjes modela Arctos 1.0.....	65
Slika 73. Promjena geometrijskih značajki stražnjeg ovjesa.....	66
Slika 74. Prednji pogled prednjeg ovjesa modela Arctos 1.0.....	68
Slika 75. Prednji pogled stražnjeg ovjesa modela Arctos 1.0 .....	68
Slika 76. Bočni pogled oba ovjesa modela Arctos 1.0 .....	69
Slika 77. Prednji ovjes modela Arctos 3.0.....	70
Slika 78. Promjene geometrijskih značajki prednjeg ovjesa za model Arctos 3.0.....	70
Slika 79. Stražnji ovjes modela Arctos 3.0.....	72
Slika 80. Promjena geometrijskih značajki stražnjeg ovjesa modela Arctos 3.0 .....	74
Slika 81. Prednji pogled prednjeg ovjesa modela Arctos 3.0.....	74
Slika 82. Položaj trenutnog središta rotacije .....	75
Slika 83. Prednji pogled stražnjeg ovjesa modela Arctos 3.0 .....	75
Slika 84. Položaj trenutnog središta rotacije za stražnji ovjes.....	76
Slika 85. Bočni pogled oba ovjesa modela Arctos 3.0 .....	76
Slika 86. Stupanj prijenosa .....	78
Slika 87. Kut zakreta oko poprečne osi vozila .....	79
Slika 88. Vertikalne sile .....	80
Slika 89. Gubitak kontakta s podlogom .....	80
Slika 90. Trajektorija procedure "Autokros" .....	81
Slika 91. Bočno ubrzanje.....	82
Slika 92. Titranje kotača.....	82
Slika 93. Promjena kuta propinjanja.....	83
Slika 94. Promjena kuta valjanja .....	84
Slika 95. Vertikalne sile .....	84
Slika 96. G-metar.....	85
Slika 97. Bočno ubrzanje.....	86
Slika 98. Kut propinjanja.....	86
Slika 99. Kut zakretanja kotača .....	87
Slika 100. Promjena kuta valjanja .....	88

Slika 101. Promjena kuta zakreta oko poprečne osi vozila .....	88
Slika 102. Promjena vertikalnih sila.....	89
Slika 103. Gubitak kontakta s tlom .....	89

## Popis tablica

Tablica 1. Vanjske dimenzije vozila .....	38
Tablica 2. Mjerenje bolida na horizontalnoj podlozi.....	41
Tablica 3. Mjerenje opterećenja na stražnjoj osovini .....	42
Tablica 4. Mjerenje opterećenja na prednjoj osovini .....	42
Tablica 5. Rezultati težišta vozila dobiveni proračunom .....	44
Tablica 6. Statičke karakteristike geometrijskih značajki .....	56
Tablica 7. Karakteristične točke prihvata prednjeg ovjesa modela Arctos 1.0 .....	61
Tablica 8. Promjene geometrijskih značajki prednjeg ovjesa .....	63
Tablica 9. Karakteristične točke prihvata stražnjeg ovjesa Arctos 1.0.....	65
Tablica 10. Promjena geometrijskih značajki stražnjeg ovjesa.....	67
Tablica 11. Karakteristične točke prihvata prednjeg ovjesa Arctos 3.0 .....	69
Tablica 12. Promjene geometrijskih značajki prednjeg ovjesa za model Arctos 3.0 .....	71
Tablica 13. Karakteristične točke prihvata stražnjeg ovjesa Arctos 3.0.....	72
Tablica 14. Promjene geometrijskih značajki modela Arctos 3.0 .....	73
Tablica 15. Usporedba geometrijski značajki modela.....	76
Tablica 16. Rezultati prije i nakon podešavanja značajki.....	90

## Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
$A_y$	$\text{m/s}^2$	Bočno ubrzanje
$a_x$	$\text{m/s}^2$	Uzdužno ubrzanje
$g$	$\text{m/s}^2$	Gravitacijska konstanta
$H_{F/R}$	mm	Visina trenutnog središta rotacije
$h$	mm	Visina težišta
$l$	mm	Međuosovinski razmak
$L_{F/R}$	mm	Vertikalna udaljenost trenutnog središta rotacije
$m$	kg	Masa vozila
$p_{F/R}$	%	Prijenosni omjer kočione sile na prednje/stražnje kotače

### Grčke oznake

$\delta$	°	Konvergentnost/divergentnost kotača (engl. <i>toe in/out</i> )
$\varepsilon_W$	°	Bočni nagib kotača (engl. <i>camber angle</i> )
$\theta$	°	Kut zakreta oko poprečne osi vozila (engl. <i>pitch</i> )
$\sigma$	°	Bočni nagib osi kotača (engl. <i>kingpin inclination</i> )
$\tau$	°	Uzdužni nagib osi kotača (engl. <i>caster angle</i> )
$\Phi_{F/R}$	°	Kut trenutnog središta rotacije za prednji/stražnji kotač
$\varphi$	°	Kut valjanja, zakret oko uzdužne osi vozila (engl. <i>roll</i> )
$\psi$	°	Kut zakreta oko vertikalne osi vozila (engl. <i>yaw</i> )

## Sažetak

U radu je prikazana analiza konstrukcije ovjesa postojećeg bolida FSB Racing Team-a Arctos (FSB-RT-04), s kojim je tim nastupao na natjecanjima Formule Student u 2013. godini. Analiza ovog bolida napravljena je u dva programska paketa. U programskom paketu Lotus Suspension Analysis analizirana je kinematika ovjesa, a u programskom paketu CarSIM analizirana je dinamika vozila.

Prije same analize navedeni su dijelovi FSAE pravilnika, koji se odnose na dinamičke ispitne procedure koje su podloge za simulacije provedene u okviru ovog rada te su detaljno objašnjene geometrijske značajke ovjesa i njihov utjecaj ponašanje vozila u vožnji.

S obzirom na uočene nedostatke u konstrukciji samog ovjesa i ponašanja FSAE bolida u vožnji, na temelju uputa i preporuka iz literature koja se odnosi na trkaća vozila, definirane su zahtjevi na ovjes vozila u cilju ostvarivanja željenog ponašanja u vožnji.

U radu je prikazana izrada modela ovjesa u programskom paketu Lotus Suspension Analysis i izrada modela kompletnog vozila u programskom paketu CarSIM.

Simulacijama vožnje izrađenih modela bolida kroz definirane ispitne procedure uspoređeno ponašanje u vožnji postojećeg bolida i bolida s u ovom radu određenim geometrijskim značajkama.

Ključne riječi: Formula Student, ovjes, CarSIM

## 1.Uvod

SAE Formula Student je natjecanje u kojem se natječu studenti kojima je cilj napraviti bolid koje propisuje pravilnik. Za sudjelovanje u natjecanju je potrebno konstruirati i izraditi model Formule Student kojem se daju ocjene od strane stručnog žirija, no osim predstavljanja i prezentacije modela moguće je i sudjelovati u natjecanju u realnom vremenu, odnosno potrebno je odvoziti testove koji su zadani pravilnikom. Ovakva vrsta natjecanja omogućava studentima priliku da pokažu i razviju svoje znanje, vještine i entuzijazam na konkretnom projektu trkaćeg vozila. Imaju priliku objediniti sva znanja stečena tijekom studiranja, iskusiti rad u velikom timu i upoznati se s ekonomskom stranom konstruiranja.

U ovom radu će se osvrnuti na mogućnost korištenja programske aplikacije CarSIM pri optimiziranju modela Formule student s aspekta ovjesa.

CarSIM je programski paket tvrtke "*Mechanical Simulation Corporation*" koji se koristi za simulaciju dinamike različitih vozila (osobnih i trkaćih automobila, gospodarskih vozila i sl.) u razvoju i konstrukciji motornih vozila ga koriste gotovo svi vodeći svjetski proizvođači vozila i proizvođači komponenti za ta ista vozila.

## 2.0 natjecanju SAE Formula Student

Natjecanje SAE Formula Student sastoji se, za 2014. godinu, od 9 događaja/utrka na kojoj se natječu ekipe koje su pripremile bolide za ta natjecanja, bilo samo u teoretskom obliku ili praktičnom dijelu. Natjecanje omogućava studentima da kao tim osmisle, konstruiraju, izrade, prezentiraju i natječu se s malim jednosjednim trkaćim vozilom u nizu statičkih i dinamičkih natjecanja. Format natjecanja je takav da pruža idealnu priliku studentima da pokažu i unaprijede svoje sposobnosti u izradi kompleksnog i integriranog proizvoda u zahtjevnom okruženju motorsport natjecanja.

Natjecanje se sastoji od statičkog i dinamičkog dijela. Na statičkom dijelu se ocjenjuje konstrukcija bolida, cijena tog bolida i prezentacije projekta. Osim ove tri discipline prema kojima se dobivaju ocjene, potrebno je na samome početku napraviti i tehnički pregled vozila prema kojem se provjerava zadovoljava li bolid zahtjeve pravilnika. Nakon zadovoljenog tehničkog pregleda vozilo smije pristupiti dinamičkom dijelu natjecanja.

Sam tehnički pregled obuhvaća tri dijela. Da bi se moglo prijeći na sljedeći dio pregleda potrebno je zadovoljiti prethodni. Prvo se utvrđuje jeli bolid uopće napravljen u skladu sa pravilnikom. Na ovome pregledu se provjera zadovoljava li za početak sigurnosne zahtjeve ovaj bolid, odnosno posjeduje li homologiranu opremu od strane FIA-e ili neke druge institucije navedene u pravilniku i zadovoljava li minimalne tehničke uvjete propisane pravilnikom. Drugi dio tehničkog pregleda obuhvaća test nagiba, točnije testira se hoće li uslijed naginjanja vozila u kojem se ujedno nalazi i vozač doći do izlivanja tekućina i hoće li bolid izdržati bočno opterećenje pri testiranju. Treći dio pregleda se sastoji od testiranja buke koju proizvodi vozilo, testiranja kočnica i glavnog prekidača vozila.

U teoretskom dijelu se ocjenjuje, kao što je već rečeno cijena bolida, konstrukcija bolida i prezentacija bolida. Cilj je skupiti što više bodova u svim disciplinama, a pri tome pokazati "potencijalnim ulagačima" zašto baš uložiti u taj projekt i prikazati njegove prednosti u odnosu na druge i prikazati da se taj projekt odlikuje i prihvatljivom cijenom.

### 2.1. Discipline natjecanja

Vozilo svake momčadi uspoređuje se s vozilima drugih momčadi kako bi se ustvrdilo koje je najbolje. Vozila se ocjenjuju u nizu statičkih i dinamičkih natjecanja. Prije statičkog djela natjecanja vozila moraju proći tehnički pregled kojeg obavlja skupina sudaca. Svako vozilo na tehničkom pregledu mora skupiti četiri naljepnice koje označuju njegovu sigurnost i spremnost za izlazak na stazu i koje su uvjet za nastavak natjecanja. Naljepnice se dobivaju za četiri vrlo bitna elementa: opći pregled bolida, pregled curenja tekućina (engl. *tilt table test*, slika 1.), kontrola buke i test kočenja (engl. *brake test*). U statički dio natjecanja spada prezentacija, konstrukcijska rješenja i analiza troškova.



*Slika 1. Pregled curenja tekućina (engl. tilt table test)*

Nakon statičkog dijela natjecanja slijedi dinamički dio. U dinamičkom dijelu natjecanja testiraju se vozne karakteristike vozila. Svaki vozač ima pravo na dva puta sudjelovati u svakoj kategoriji natjecanja osim u zadnjoj.

Dinamički dio natjecanja se sastoji od 5 disciplina:

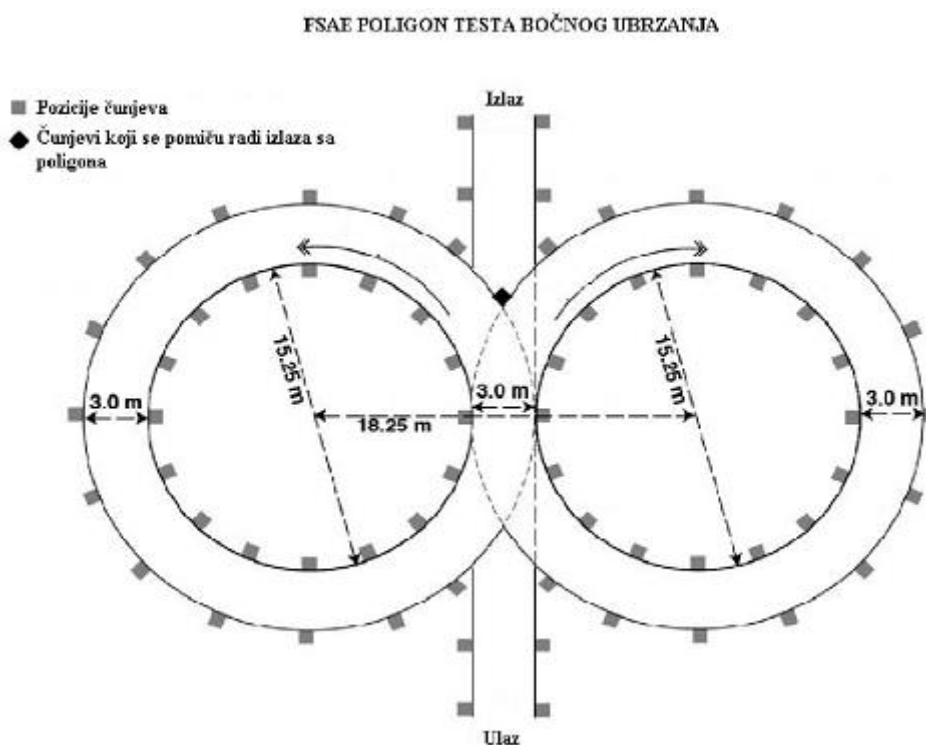
- Ubrzanje
- Osmica (engl. *skid pad*)
- Autokros
- Potrošnja goriva
- Izdržljivost

Ubrzanje je disciplina koja se odvija na 75 metara dugoj stazi. Tu se mjeri ubrzanje bolida i boduje se najbolji pokušaj. Za sva discipline je potrebno imati dva vozača, te svaki od njih ima po dva pokušaja i od ukupno četiri pokušaja se boduje i uzima u obzir onaj najbolji. Uvjet je da se zadanu stazu prijeđe za maksimalno 5,8 sekundi, ekipa dobiva 0 bodova u toj disciplini.

Osmica je disciplina u kojoj se testiraju mogućnosti bolida u prolasku zavoja konstantnog polumjera na ravnoj podlozi, slika 2. U ovoj disciplini također sudjeluju dva vozača koja imaju pravo voziti dva kruga po stazi koja je ograđena čunjevima.



Rušenjem čunjeva skupljaju se negativni bodovi, a izletavanjem sa staze se dobiva 0 bodova.



*Slika 2. Poligon testa bočnog ubrzanja*

Autokros je disciplina kojom se testiraju vozne karakteristike bolida. Staza je kružna i sastoji se od zavoja na čijim rubovima se nalaze čunjevi. Na ravnom djelu staze se isto nalaze čunjevi kroz koje bolid mora proći. Na toj stazi, u ovoj disciplini svaki bolid vozi zasebno i oba vozača voze po dva kruga i mjeri se prolazno vrijeme te se ono najbolje ocjenjuje.

Disciplina u kojoj se mjeri potrošnja goriva i izdržljivost vozila se mjere u isto vrijeme. Svi bolidi koji nastupaju su u isto vrijeme na stazi. Staza je duga 22 km, te svaki od bolida dobije pun spremnik goriva i nakon odvezenih 22 km se mjeri potrošeno gorivo dodavanjem goriva u spremnik. Staza je kružna i svaki vozač mora odvesti 11 km, te nakon toga ide izmjena koja može trajati maksimalno 3 minute. Za vrijeme izmjene vozača nije moguće raditi nikakve preinake na vozilu ili popravke ukoliko se dogodi neki kvar.

Kako bi se prikazala važnost dinamičkog dijela natjecanja prikazan je sustav bodovanja. Iz prikaza se vidi da dinamički dio natjecanja nosi 67,5% ukupnih bodova.

Bodovi statičkog dijela natjecanja (engl. *Static Events Points*):

➤ Presentacija	75
➤ Inženjerska konstrukcija	150
➤ Analiza troškova	100
➤ $\Sigma$	325

Bodovi dinamičkog dijela natjecanja (engl. *Dynamic Events Points*)

➤ Ubrzanje	75
➤ Skid-Pad	50
➤ Autocross	150
➤ Test potrošnje goriva	100
➤ Test izdržljivosti	300
➤ $\Sigma$	675

Ukupni broj bodova (engl. *Total Points*) je 1000.

## **2.2. Izvadak iz pravilnika (2014 Formula SAE Rules)**

Pravilnik natjecanja(2014 Formula SAE Rules) podijeljen je na 7 dijelova: A, T, AF, IC, EV, S i D dio. A dio se odnosi na administrativne zahtjeve, T na tehnička pravila. AF se odnosi na alternativna pravila kostura, IC na vozila s motore s unutarnjim izgaranjem, a EV na tehnička pravila električnih vozila. S dio je za zahtjeve statičkog dijela, a D dinamičkog dijela. Zahtjevi koji trebaju biti zadovoljeni za dinamički dio su u dijelu D pod člancima 1., 4., 5., 6., 7. i 8. U nastavku će biti prikazani spomenuti članci te što je njima propisano za pravilno sudjelovanje u natjecanju.

### **2.2.1. D dio pravilnika (2014 Formula SAE Rules)**

#### **ČLANAK 1: Dinamičko testiranje i maksimalni bodovi**

Tablica sa maksimalno moguće ostvarivim bodovima je već navedena u tekstu iznad.

##### **D.1.1** Ispravnost vozila i diskvalifikacija

D.1.1.1 Za vrijeme izvođenja dinamičkih testova, mehanička ispravnost vozila je potrebno održavati

D.1.1.2 Bilo koje stanje vozila koje može ugroziti ispravnost vozila ili bi moglo ugroziti stanje na stazi te nanijeti štetu sudionicima , kao npr.: oštećenje ovjesa, kočnica ili upravljačkog sklopa, istjecanje tekućina, otpadajući dijelovi tijela vozila, izgubljeni ili otpali dijelovi vozila ili neispravno svijetlo kočnice su razlozi zbog kojeg može doći do isključenja/diskvalifikacije dok se problem ne otkloni.

Napomena: Ako se ovo dogodi za vrijeme ispita izdržljivosti znači trenutnu diskvalifikaciju.

## **ČLANAK 4: Ograničenja vozača**

### **D4.1 Ograničenje sudjelovanja u testovima**

Individualni član tima ne može voziti u više od 3 testiranja.

- D4.1.1 Test potrošnje goriva se smatra zasebnim testiranjem iako se odvija paralelno sa testom izdržljivosti.

### **D4.2 Ograničenje u izvođenju pojedinog testiranja**

Individualni član ne može voziti u oba izvođenja testiranja. Ovisi o timu hoće li se natjecati na svakome testiranju.

- D4.2.1 Tim može odustati od drugog izvođenja bilo kojeg testiranja.

Napomena: Pri izvođenju natjecanja gdje se provodi testiranje izdržljivosti i potrošnje goriva tim mora imati barem četiri vozača na raspolaganju pri izvođenju samo jedne vožnje svih testiranja. Pri natjecanju gdje se provode dvije vožnje, potrebno je imati na raspolaganju barem pet vozača kako bi se moglo sudjelovati u svim natjecanjima.

## **ČLANAK 5: Ubrzanje**

### **D5.1 Cilj**

Testiranje ubrzanja ocjenjuje ubrzanje vozila po ravnom pravcu na ravnoj podlozi.

### **D5.2 Procedura testiranja**

Opis staze – Duljina staza utrke ubrzanja je 75 metara od startne do ciljne linije. Širina staza je najmanje 4,9 metara širine mjereno između unutarnjih rubova čunjeva koji označavaju stazu. Čunjevi su postavljeni duž staze u intervalima od 5 koraka (oko 6 metara). Pozicije čunjeva nisu označene na pločniku.

- D5.2.1 Postavljanje – Prije svega vozilo će biti postavljeno 0,3 metra iza startne linije. Vozila će početi utrku ubrzanja s mjesta.

- D5.2.2 Kretanje- Zelena zastava će označiti odobrenje za početak izvođenja, no međutim, mjerenje počinje tek kada vozilo prijeđe startnu liniju.

- D5.2.3 Opcija druge vožnje- vozača ima mogućnost hoće li odvesti drugu vožnju odmah nakon izvođenja prve vožnje.

### **D5.3 Izvođenje ubrzanja**

- D5.3.1 Testiranje se izvodi dva puta. Svako izvođenje mora izvoditi drugi vozač, a svaki vozač ima pravo na dva pokušaja.

### **D5.4. Trakcija gume-ograničenja**

Specijalni dodaci koji pojačavaju trakciju ne smiju se dodavati na gume i stazu, te nije dozvoljeno proklizavanje gume tzv. "burnouts".

#### **D5.5 Bodovanje ubrzanja**

Bodovanje utrke ubrzanja je bazirano na vremenu potrebnom da se prođe staza. Zabilježeno vrijeme će se mjeriti od kada vozilo prođe startnu liniju i sve dok ne prođe ciljnu liniju.

#### **D5.8 Formula za bodovanje testa ubrzanja**

D5.8.1 Rezultat testa ubrzanja se nalazi između nule i sedamdeset i pet i računa se prema napravljenom vremenu.

D5.8.2 Prema sljedećem izrazu se određuje rezultat u bodovima:

$$\text{Bodovi ubrzanja} = (71,5 \times (T_{\max} / T_{\text{your}}) - 1) / ((T_{\max} / T_{\min}) - 1) + 3,5$$

Oznake:

**T<sub>your</sub>**: najbolje vrijeme koje je tim postigao uključujući i penale

**T<sub>min</sub>**: vrijeme koje je napravilo najbrže vozilo

**T<sub>max</sub>**: 150% od T<sub>min</sub>

### **ČLANAK 6: SKID-PAD NATJECANJE**

#### **D6.1 Skid-Pad -Cilj**

Cilj Skid-Pad natjecanja je ispitati sposobnost skretanja vozila u zavoju na ravnoj podlozi dok radi krugove konstantnog radijusa.

#### **D6.4 Skid-Pad staza (Slika 2.)**

Postavljena su dva para koncentričnih krugova u obliku osmice. Centri krugova će biti udaljeni 18,25 metara. Unutarnji krugovi su promjera 15,25 metara, a vanjski 21,25 metara. Širina staze je 3 metra, i to je udaljenost između vanjskog i unutarnjeg kruga. Vozila će ući na stazu kroz prolaz širine 3 metra koja je tangencijalna s mjestom gdje se krugovi sijeku. Linija između centara krugova definira startnu/ciljnu liniju. Jedan krug je definiran tako da putujući po jednom krugu krenemo od startne/ciljne linije i vratimo se na to isto mjesto.

#### **D6.6 Skid-Pad procedure**

Vozilo ulazi okomito u figuru osmice i radi dva puna desna kruga te dva puna lijeva kruga. Drugi i četvrti krug su mjereni krugovi. Po završetku četvrtog kruga vozilo će izaći sa staze u istom smjeru u kojem je i ušao. Vozač ima opciju ponoviti vožnju odmah nakon prve vožnje.

#### **D6.7 Skid-Pad kazne**

Uzima se prosjek vremena izmjereno za lijevu i desnu stranu kruga nakon zbrajanja vremena sa kaznama.

D6.7.1      Srušeni čunjevi  
Kazna od 0,25 sekundi biti će dodana na vrijeme za svaki čunj koji je srušen.

D6.7.2      Izvan staze  
Vozila koja se izvrte mogu nastaviti vožnju sve dok nisu otišla van staze. Vozila koja odu van staze biti će klasificirana kao DNF (nije završio, engl. did not finish)

## **D6.8      Skid-Pad bodovanje**

D6.8.1      Skid-pad rezultat se računa na temelju sposobnosti bočnog ubrzanja. Bočno ubrzanje (obično se naziva G's) izračunava se iz  $2,012 \text{ promjer}/t^2$ . Promjer 17,10 metara preuzet će se u računanje bočnog G.

D6.8.3      Prema sljedećem izrazu se određuje rezultat u bodovima:

Slika 2. Poligon testa bočnog ubrzanja

Oznake:

**Tyour:** prosječno vrijeme najboljeg lijevog i desnog kruga uz penale

**Tmin:** najbolje vrijeme

**Tmax:** 125 % od Tmin

## **ČLANAK 7: AUTOCROSS NATJECANJE**

### **D7.1      Autocross - cilj**

Cilj autocross natjecanja je ocijeniti upravljivost i kvalitetu rukovanja na uskoj stazi bez zapreka. Autocross natjecanje kombinira vozne izvedbe kao što su karakteristike ubrzanja, kočenja i skretanja u jednom natjecanju.

### **D7.2      Autocross specifikacije staze i brzina**

D7.2.1      Sljedeće standardne specifikacije će odrediti maksimalnu brzinu koja se može postići na stazi. Prosječne brzine bi trebale biti od 40 km/h do 48 km/h.

**Pravci:** Ne duži od 60 metara s oštrim zavojima na krajevima ili duži od 45 metara s blagim zavojima na kraju.

**Zavoji konstantnog radijusa:** Zavoji promjera od 23 metra do 45 metara.

**Oštri zavoji:** Najmanje od 9 metara u vanjskom promjeru zavoja.

**Slalomi:** Čunjevi u pravcu s razmakom od 7,62 metra do 12,19 metara.

**Razno:** Šikane, više zavoja, zavoji u kojima se smanjuje polumjer, itd. Najmanja širina staze je 3,5 metra.

D7.2.2      Dužina staze biti će približno 805 metara i vozači će završiti određeni broj krugova.

### **D7.3      Autocross procedura**

- D7.3.4 Vozilo se pozicionira tako da prednji kotač bude 6 metara iza startne linije. Mjerač vremena počinje odbrojavati nakon što vozilo prođe startnu liniju.
- D7.4 Autocross kazne
- Ocjenjuje se postignuto vrijeme plus kazne. Sljedeće kazne se dodaju na postignuto vrijeme:
- D7.4.1 Srušeni čunjevi
- Dvije sekunde po čunju, uključujući i one nakon ciljne linije.
- D7.4.2 Izlazak sa staze (OC)
- a) Izlazak sa staze se događa kada vozilo ima sva četiri kotača van granica staze, koja je označena sa (a) čunjevima, (b) označenim rubovima, (c) rubovima asfaltirane površine. Ako na stazi ima više indikatora staze, u bilo kojem trenutku najuži dio staze koristit će se za određivanje kazne.
- b) Kada se OC dogodi vozač mora ponovno ući na stazu gdje je izletio, u protivnom se kažnjava sa 20 sekundi kazne.
- c) Dva kotača van staze neće istog trena uzrokovat kaznu. Ali ponovljena takva vožnja je uzrok za crnu zastavu.
- d) Kazne se neće dodjeljivati za izbjegavanje nesreća ili drugih razloga koji se smatraju dovoljno dobrim razlogom od strane sudaca na stazi.
- D7.4.3 Propušteni slalom
- Neprolazak kroz jedno ili više vrata danog slaloma će se brojati kao izlazak sa staze. Svaka takva pojava kažnjava se sa 20 sekundi kazne.
- D7.6 Točno prolazno vrijeme
- D7.6.2 Vozilima koja su u nemogućnosti završiti stazu sa prosječnom brzinom od 69% najbržeg vozila neće se dodijeliti bodovi za izvedbu. To znači da ako prolazno vrijeme autocrossa prelazi 145% od najbržeg vozila neće se dobiti bodovi.
- D7.8 Prema sljedećem izrazu se određuje rezultat u bodovima:
- $$\text{Autokros bodovi} = 142,5 \times \frac{(T_{\max}/T_{\text{your}}) - 1}{(T_{\max}/T_{\min}) - 1} + 7,5$$
- Oznake:
- T<sub>your</sub>**: najniže vrijeme kruga vožnje koje je zabilježeno za tim
- T<sub>min</sub>**: najniže vrijeme kruga za svaki od timova u svakom pokušaju
- T<sub>max</sub>**: 145% od T<sub>min</sub>

## ČLANAK 8: IZDRŽLJIVOST I POTROŠNJA

### D8.2 Pravo vozača

Utrka izdržljivosti i utrka potrošnje goriva su dva različita događanja iako se izvode istovremeno. Dakle, svatko tko sudjeluje u utrci izdržljivosti i utrci potrošnje goriva koristi dva vozača.

#### **D8.4 Utrka izdržljivosti – cilj —300 bodova**

Utrka izdržljivosti je napravljena da ocijeni sveukupnu učinkovitost vozila i testira vozilu trajnost i pouzdanost.

#### **D8.5 Utrka potrošnje goriva —100 bodova**

Potrošnja goriva vozila biti će izmjerena u sklopu s utrkom izdržljivosti. Učinkovitost pod uvjetima natjecanja je važna u natjecanjima vozila i pokazuje koliko dobro je vozilo podešeno za natjecanje. To je kompromis natjecanje jer će se rezultati potrošnje goriva i izdržljivosti računati iz istog natjecanja. Ponovno punjenje nije dozvoljeno za vrijeme natjecanja.

#### **D8.6 Utrka izdržljivosti specifikacije staze i brzina**

D8.6.1 Sljedeće standardne specifikacije će predložiti najveću brzinu koja se može naći na stazi. Prosječne brzine bi trebale biti od 48 km/h do 57 km/h dok bi maksimalne brzine trebale dostizati 105 km/h.

D8.6.2 Standardne specifikacije za FSAE utrku izdržljivosti su:

**Pravci:** Ne duži od 77 metara s oštrim zavojima na krajevima ili duži od 61 metara s blagim zavojima na kraju. Biti će zona pretjecanja na nekoliko lokacija.

**Zavoji konstantnog radijusa:** Zavoji promjera od 30 metra do 54 metra.

**Oštri zavoji:** Najmanje od 9 metara vanjski promjer zavoja.

**Slalom:** Čunjevi u pravcu s razmakom od 9 metra do 15 metara.

**Razno:** Šikane, više zavoja, zavoji u kojima se smanjuje polumjer, itd. Najmanja širina staze je 4,5 metra.

#### **D8.7 Utrka izdržljivosti generalna procedura**

D8.7.1 Događaj će se izvoditi kao jedno natjecanje dugo otprilike 22 kilometra.

D8.7.2 Ekipama nije dozvoljeno raditi na vozilu za vrijeme natjecanja.

D8.7.3 Zamjena vozača mora se dogoditi za vrijeme tri minute na polovici natjecanja.

D8.7.4 Vožnja kotač uz kotač nije dozvoljena.

D8.7.5 Vozilo ne smije biti voženo unazad.

D8.7.6 Pretjecanje drugog vozila dozvoljeno je samo u određenim zonama pretjecanja ili uz kontrolu voditelja natjecanja.

D8.7.7 Mjereno vrijeme će početi kada Vozač A uđe na stazu i prođe liniju koja mjeri vrijeme.

#### **D8.15 Utrka izdržljivosti minimalna potrebna brzina.**

D8.15.1 Ako vozilo nije u mogućnosti zadržati vrijeme od 145% najbržeg vremena staze, mora odmah izaći sa staze.

## **D8.18 Utrka izdržljivosti kazne**

D8.18.1 Kazne se neće dodjeljivati za izbjegavanje nesreća ili drugih razloga koji se smatraju dovoljno dobrim razlogom od strane dužnosnika na stazi.

D8.18.2 Kazne koje su na snazi tijekom utrke izdržljivosti navedene su u nastavku:

D8.18.3 Srušeni čunjevi

Dvije sekunde po čunju, uključujući i one nakon ciljne linije i prije startne linije.

D8.18.4 Izlazak sa staze (OC)

a) Izlazak sa staze se događa kada vozilo ima sva četiri kotača van granica staze, koja je označena sa (a) čunjevima, (b) označenim rubovima, (c) rubovima asfaltirane površine. Ako na stazi ima više indikatora staze, u bilo kojem trenutku najuži dio staze koristit će se za određivanje kazne.

b) Kada se OC dogodi vozač mora ponovno ući na stazu gdje je izletio u protivnom se kažnjava sa 20 sekundi kazne.

c) Dva kotača van staze neće istog trena uzrokovat kaznu. Ali ponovljena takva vožnja

je uzrok za crnu zastavu.

D8.18.5 Propušteni slalom

Neprolazak kroz jedno ili više vrata danog slaloma će se brojati kao izlazak sa staze. Svaka takva pojava kažnjavać će se sa 20 sekundi kazne.

## **D8.20 Izraz za bodovanje na testu izdržljivosti**

D8.20.1 Vremena na testu izdržljivosti će se računati na temelju zbroja ukupnog vremena svakog vozača pojedinačno uz kazne.

D8.20.2 Izraz za računanje bodova na testiranju:

Ako je **T<sub>your</sub>** < ili = **T<sub>max</sub>**:

$$\text{Bodovi na testiranju} = 250 \times \frac{(T_{\max}/T_{\text{your}}) - 1}{(T_{\max}/T_{\min}) - 1} + 50$$

Ako je **T<sub>your</sub>** > **T<sub>max</sub>**: Bodovi na testiranju=0

**T<sub>min</sub>** je najlošije vrijeme najbrže momčadi na testiranju

**T<sub>your</sub>** je kombinirano vrijeme oba vozača testiranja

**T<sub>max</sub>** je 145 % od **T<sub>min</sub>**

Ako su bodovi < **Laps Comp**, tada bodovi = **Laps Comp**



**Laps Comp** je broj potpuno završeni krugova cijele momčadi.

## **D8.22 Izraz za računanje potrošnje goriva**

### **D8.22.1 CO<sub>2</sub> koeficijent pretvaranja**

Masa CO<sub>2</sub> ispuštena u atmosferu će se proračunati pomoću koeficijenta pretvaranja koji su niže navedeni iz količine goriva koja je potrošena. Koeficijent bi trebali pokazati prosječnu potrošnju goriva i organizatori neće uzimati u obzir otkuda je gorivo došlo.

Bezolovni benzin - 2,31 kg CO<sub>2</sub> po litri goriva

Električna energija - 0,65 kg CO<sub>2</sub> po kWh

E85 - 1,65 kg CO<sub>2</sub> po litri goriva

NAPOMENA: iznos električne energije predviđa i gubitke pri punjenju ako su ćelije punjene preko dva sata

### **D8.22.3 Izrazi za računanje potrošnje goriva**

$$\text{Bodovi za potrošnju} = 100 \times \left( \frac{(FuelEfficiencyFactor_{\min} / FuelEfficiencyFactor_{YOUR}) - 1}{(FuelEfficiencyFactor_{\min} / FuelEfficiencyFactor_{MAX}) - 1} \right)$$

*i*

$$\text{Faktor potrošnje} = 100 \times \left( \frac{(T_{\min} / Laptotal_{T\min})}{(T_{YOURS} / Lapyours)} \right) \times \left( \frac{(CO_{2\min} / Laptotal_{CO2\min})}{(CO_{2YOURS} / Lapyours)} \right)$$

Oznake:

**CO<sub>2MIN</sub>** je najmanja masa CO<sub>2</sub> koja je izračunata za svakog natjecatelja, čije proračunato vrijeme T<sub>your</sub> y 1.45 x korigirano prosječno vrijeme najbrže ekipe koja završi test izdržljivosti.

**CO<sub>2your</sub>** je količina CO<sub>2</sub> koju je postigla momčad

**T<sub>min</sub>** je najniže korigirano vrijeme pri testu izdržljivosti najbrže momčadi pri testiranju, čija potrošnja ne prelazi 26litara/100 km ili energetski ekvivalent od 60,06 kg CO<sub>2</sub>/100km.

**T<sub>your</sub>** je kombinirano korigirano vrijeme vozača u tvojoj vožnji.

**Lapyours** broj krugova prema kojima je ocjenjena momčad.

**Laptotalmin** and **LaptotalCO<sub>2min</sub>** je broj krugova koje je završila momčad koja je postavila T<sub>min</sub> i CO<sub>2MIN</sub>.

**FuelEfficiencyFactormin** se računa koristeći **CO<sub>2YOUR</sub>** koji je ekvivalentan 60,06 kg CO<sub>2</sub>/100km i **T<sub>yours</sub>** koji treba približno

odgovarati 1.45 od ukupno korigiranog vremena najbrže momčadi koja završi test izdržljivosti u potpunosti.

**D8.27 Utrka izdržljivosti - pretjecanje**

D8.27.2 Zone pretjecanja imaju dvije paralelne linije – spora linija je za vozila koje se prelazi, a brza linija je za vozila koja pretječu neko vozilo. Prilazeći zoni pretjecanja sporijem vodećem vozilu biti će pokazana plava zastava i to vozilo mora otići u sporu liniju i usporiti. Vozilo koje je brže će nastaviti ići po brzoj liniji i preteći vozilo. Vozilo koje je preteknuto može se vratiti u promet samo uz kontrolu čovjeka sa zastavama koji je na kraju zone pretjecanja.

D8.27.5 U normalnim uvjetima vožnje kada nema pretjecanja svi auti mogu koristiti brzu liniju.

### 3.Ovjes vozila

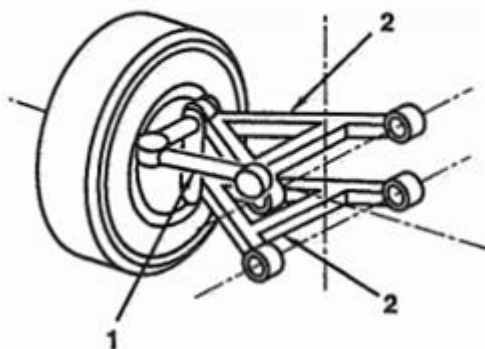
Izrada ovjesa bilo serijski bilo trkaćih vozila jedan je od najzahtjevnijih zadataka u razvoju cestovnih vozila, a osim toga radi se o višedisciplinarnom zadatku. U ovome poglavlju analizirati će se konkretno geometrijske značajke, odnosno kinematika ovjesa koje i jesu tema ovoga rada.

Kada se govori o geometriji ovjesa misli se na široku temu koja se odnosi na to kako je neovješena masa spojena na ovješenu masu, a to uvelike utječe na to kako će se vozilo ponašati pri relativnom kretanju po putanji i kako će se sile međusobno prenositi.

Geometrijske značajke ovjesa se određuju u skladu sa zahtjevima za to vozilo, jer ne postoji gotovo rješenje za svaku situaciju, već je postojeću ili odabranu geometriju potrebno podesiti tako se ostvare postavljeni zahtjevi. U svijetu trkaćih vozila, ovjes mora biti podešen tako da su ostvareni svi postavljeni zahtjevi ali se pri tome treba misliti i na vozača jer on isto tako igra bitan faktor, jer on treba vladati tako podešenim ovjesom. Ovjes na bilo kojem vozilu je veliki kompromis između svih značajki međusobno jer nema najboljeg ovjesa i da ga se može uvijek koristiti kao predložak, nego je stvar namjene i prema tome se kreće u konstruiranje ovjesa. Zahtjevi za ovjesom koji će se primjenjivati su sljedeći:

- bočni nagib osi zakretanja kotača-do  $8^\circ$
- uzdužni nagib osi zakretanja kotača-od  $3\div 9^\circ$
- bočni nagib kotača-iznos bočnog nagiba ovisi o stazi na kojoj se vozi i u skladu s time se podešava
- divergentnost/konvergentnost kotača-preporuka je da iznosi 10% iznosa bočnog nagiba kotača, no isto se podešava prema potrebi
- anti-značajke-iznos značajke *anti-dive* do 30 %, a značajke *anti-squat* do 40%

U ovome radu će se govoriti o nezavisnom ovjesu, na prednjoj i stražnjoj osovini, te će ovjes biti izveden pomoću dvije poprečne vodilice (označeno sa 2) i sponom(označeno sa 1), slika 3.



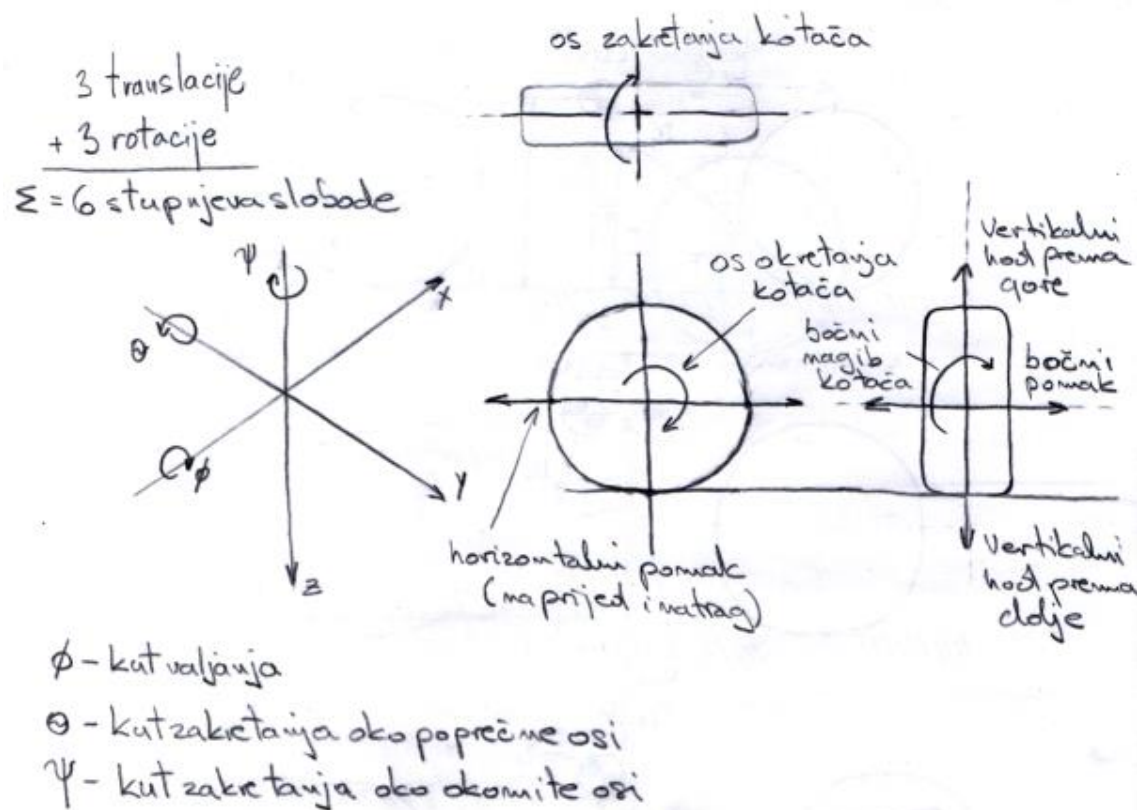
Slika 3. Dvostruke poprečne vodilice[3]

#### 3.1. Geometrijske značajke ovjesa

Značajki vezanih za ovjes ima nekoliko, te ako se na njih pogleda kao na varijable, može se reći da imamo matematički problem u kojem imamo više nepoznanica nego

jednadžbi, s time da i te poznanice koje imamo su praktične ili teoretske pretpostavke koje ne moraju nužno i odgovarati postavljenim zahtjevima. Kao što je već rečeno, da bi se dobio povoljan, kvalitetan rezultat, potreban je međusobni kompromis.

Prije svega, treba definirati koliko stupnjeva slobode posjeduje vozilo u kretanju. Tijelo u kretanju se sastoji od šest stupnjeva slobode, odnosno tri translatorna gibanja i tri rotacijska gibanja i to u to u trodimenzijalnom svijetu, slika 4 .

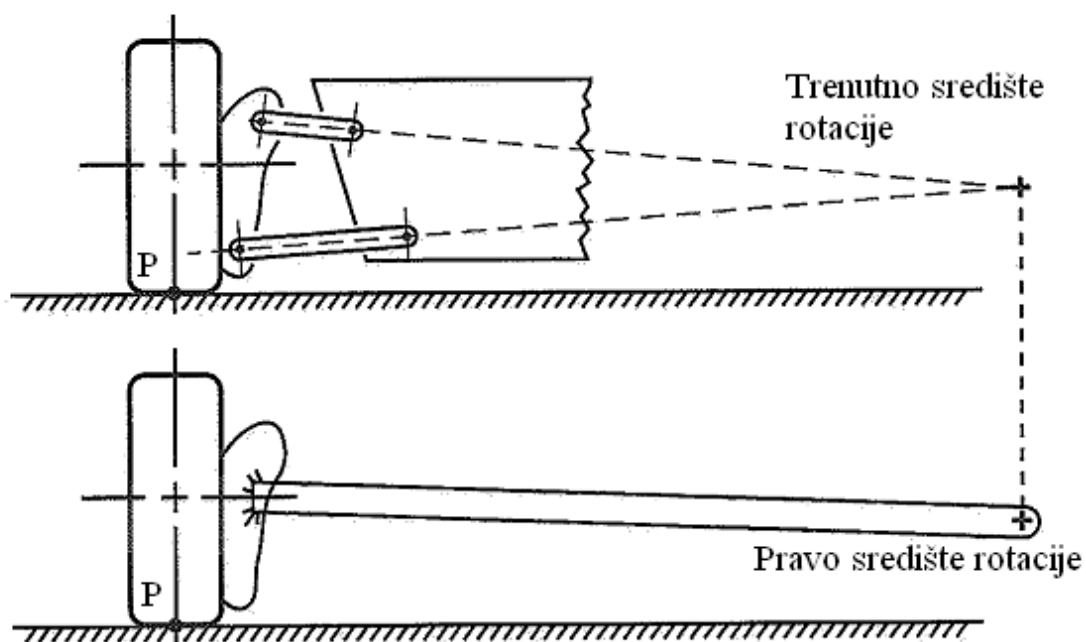


Slika 4. Stupnjevi slobode gibanja vozila

Kod nezavisnog ovjesa može se slobodno reći da se vozilo gotovo uvijek giba relativno po jednoj zamišljenoj putanji, a da bi se to omogućilo potrebno je da takav ovjes ima pet točaka koje pružaju otpor, odnosno ograničenje u kretanju tih točaka koje čine spoj ovještene i neovještene mase te time omogućavaju držanje tog zamišljenog pravca, slika 3.

### 3.1.1. Trenutno središte rotacije geometrije ovjesa

Trenutno središte rotacije (engl. *instant center*) kod geometrije ovjesa služi za određivanje promjene nekoliko parametra, značajki ovjesa, točnije njegova pozicija isto tako utječe na njih. Taj centar se naziva trenutnim iz tog razloga što je to promjenjiva veličina, zavisna o hodu kotača te svojim položajem u prostoru utječe na druge značajke, te ga se isto tako može poistovjetiti sa trenutnim polom rotacije. Položaj trenutnog središta rotacije zavisi o konstrukciji ovjesa i namijeni ovjesa, on može biti bilo gdje u prostoru, ispred ili iza kotača, te iznad ili ispod razine tla, slika 5.



Slika 5. Trenutno središte rotacije[3]

Trenutno središte rotacije je proizašlo iz gledišta na vozilo rastavi u dvije ravnine, samo iz razloga što je tako lakše riješiti trodimenzijski problem ukoliko se podijeli u dva ravninska dvodimenzijska problema. Ti problemi su ustvari dva pogleda, pogled sprijeda, te bočni pogled na geometriju. Ti pogledi su prikazani kao ravnine na koje projiciraju spojne točke ovjesa te se na temelju njih mogu odrediti položaji trenutnih središta rotacije u oba pogleda. Položaji trenutnih središta rotacije se određuju provlačenjem pravca kroz točku spoja vodilice (engl. *A-arm*) sa glavčinom (engl. *upright*), te točku spoja vodilice sa šasijom vozila. Ako to napravimo za obje vodilice, gornju i donju, te ukoliko vodilice nisu u potpunosti paralelne dobiti će se presjecište ta dva pravca i to presjecište je trenutno središte rotacije (Slika 5). Pomoću pogleda sprijeda na geometriju kotača može se vidjeti utjecaj na promjenu bočnog nagiba kotača (engl. *camber change rate*) u hodu, informacija o centru valjanja vozila (engl. *body roll center*) te podaci potrebni za definiranje karakteristike upravljanja. Pomoću bočnog pogleda je moguće vidjeti kretanje kotača naprijed/natrag (engl. *wheelbase change*), anti-značajke te promjenu uzdužnog nagiba osi kotača (engl. *caster change rate*). Trenutno središte rotacije predstavlja trenutnu os oko koje rotira kotač pri svome kretanju, odnosno hodu.

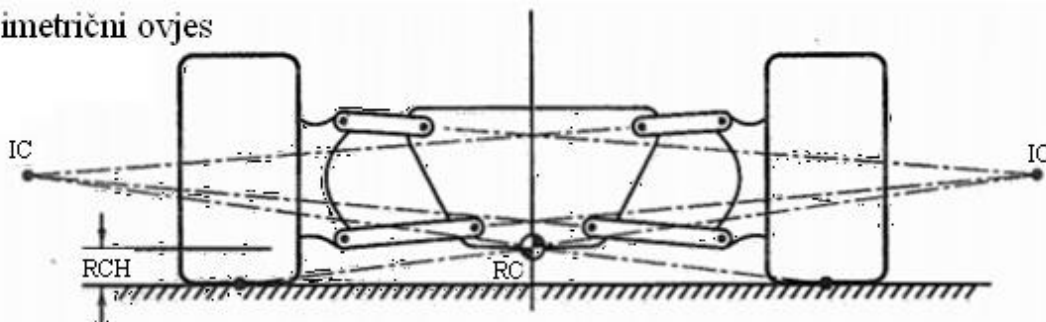
### 3.1.2. Prednji pogled na geometriju ovjesa

Prednji pogled na geometriju ovjesa (engl. *front view swing arm geometry*) nam omogućuje definiranje visine centra valjanja. Pomoću njega se može odrediti kolika će biti promjena nagiba kotača u hodu te polumjer zakreta kotača.

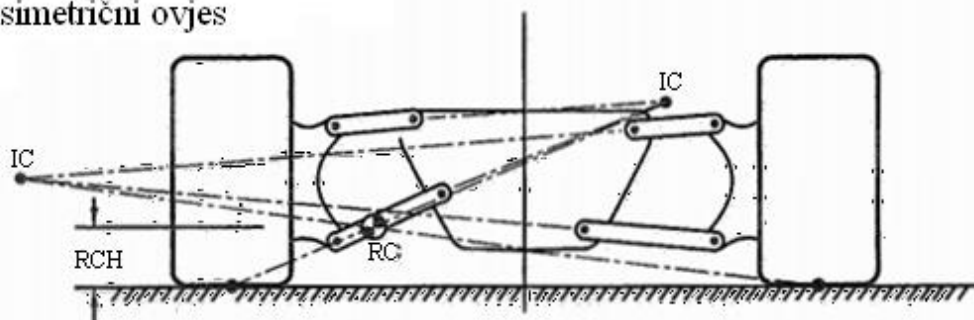
Temeljem trenutnih saznanja, prvo što se može uočiti i definirati je visina centra valjanja vozila (engl. *roll center height*). Tu visinu se definira na način da se prvo definiraju trenutno središte rotacije oba kotača u prednjem pogledu. Nakon što se

definiraju položaji trenutnih središta rotacije potrebno je provući pravac između tog trenutnog središta rotacije i točke gdje se spaja kotač sa podlogom, slika 6.

#### Simetrični ovjes



#### Asimetrični ovjes



IC- trenutno središte rotacije (eng. instant center)

RC- centar valjanja (eng. roll center)

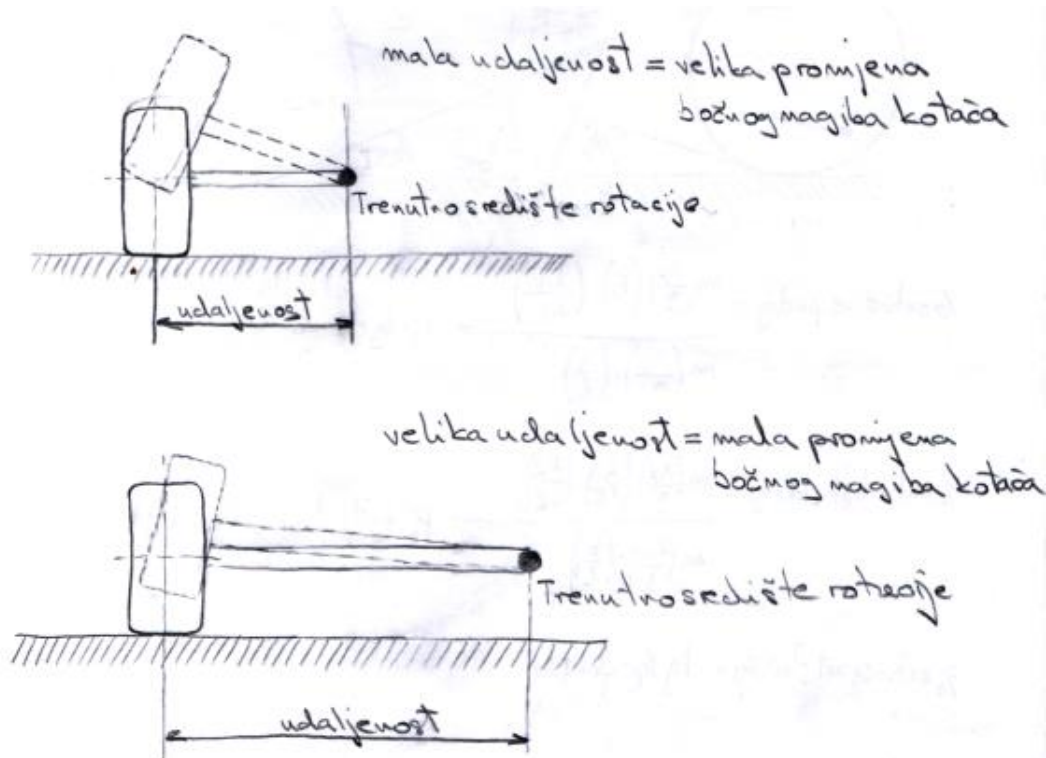
RCH- visina centra valjanja (eng. roll center height)

Slika 6. Konstruiranje centra valjalja vozila

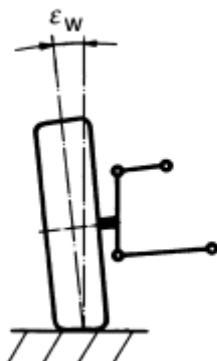
Ukoliko je geometrija ovjesa simetrična, centar valjanja mase će se nalaziti na uzdužnoj ravnini simetrije vozila jer će se tu presjeći pravci koji su prethodno provučeni kroz točke. Ukoliko geometrija ovjesa nije simetrična tada centar valjanja neće biti na uzdužnoj ravnini simetrije vozila nego će biti pomaknut u stranu. Kretanje centra valjanja će zavisiti o kutu zakreta vozila oko osi valjanja vozila (engl. *body roll axis*) te o položaju trenutnog središta rotacije.

Centar valjanja je centar u kojem se reduciraju sile i momenti koji djeluju na vozilo te je ujedno i točka koja raspodjeljuje silu između ovješene i neovješene mase. Npr., kada vozilo ulazi u zavoj na njega će djelovati centrifugalna sila u težištu vozila te će se prenijeti preko centra valjanja na kotače. Zavisno o visini centra valjanja ovisi hoće li se na kotače prenijeti veći dio sile i momenata ili manji. Što je centar valjanja viši, to je iznos sile i momenata manji koji će biti preneseni na kotače i obratno ukoliko je centar valjanja niži, momenti i sile koji će djelovati i koje će se prenijeti su veće. No, osim prijenosa sile i momenata, položaj, odnosno visina centra valjanja utječe i na gibanje ovješene mase. Ako se centar valjanja nalazi iznad tla, tada dolazi do stvaranja momenta uslijed djelovanja bočne sile oko trenutnog središta rotacije koji potiskuje kotač prema dolje, a ovješena masa se giba prema gore. Ukoliko je centar valjanja ispod tla, osim gibanja kotača prema dolje uslijed momenta oko trenutnog središta rotacije i ovješena masa se giba prema dolje. Zaključak je da će se ovješena masa bezobzira na položaj centra valjanja gibati vertikalno uslijed bočne sile koja djeluje na kotač.

Slijedeća značajka koja se određuje pomoću ovoga pogleda je promjena nagiba kotača u ovisnosti o hodu kotača. Brzina kojom će se mijenjati nagib kotača ovisi isto tako o položaju trenutnog središta rotacije. Ovisnost ovih dviju veličina je udaljenost od dodirne točke kotača i podloge i položaja trenutnog središta rotacije. Što je ta udaljenost veća to je manja promjena bočnog nagiba kotača u hodu, odnosno manja brzina promjene, a ako se ta udaljenost postavi na manju vrijednost brzina promjene će biti veća. To je logično ukoliko se gleda na to sa kinematske strane jer ako je vodilica duža ili kraća to to utječe na to hoće li brzina biti manja, odnosno veća, slika 7. Potrebno je napomenuti da je ovo nije isto što i statički bočni nagib kotača, slika . Statički bočni nagib kotača je kut između vertikalne ravnine vozila i vertikalne ravnine kotača.

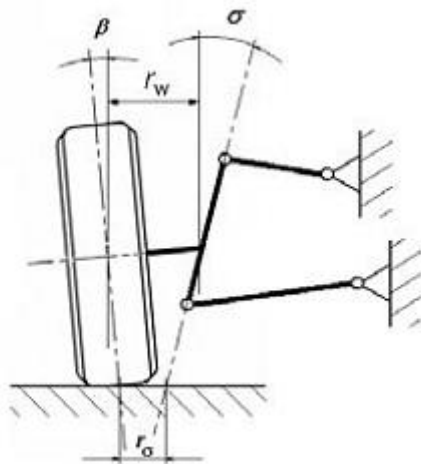


Slika 7. Promjena nagiba kotača



Slika 8. Bočni nagib kotača[7]

Polumjer zakreta kotača (engl. *scrub radius*) je značajka koja je još vidljiva iz ovog pogleda. Njegova promjena se događa uslijed promjene hoda, a mijenja se u horizontalnom smjeru. Polumjer zakreta kotača je udaljenost između središta kotača i točke na kojoj os zakretanja kotača siječe tlo, slika 9.



Slika 9. Polumjer zakreta kotača[7]

Polumjer zakreta kotača je između ostaloga funkcija duljine vodilica te kao takva kao i sve značajke do sada te ovisi o položaju trenutnog središta rotacije. Promjenom položaja se mijenja i iznos promjene polumjera zakreta. Promjena polumjera zakreta kotača je najmanja kada je trenutno središte rotacije pozicionirano na tlu i unutar vozila. Ukoliko je iznad tla ima tendenciju izbacivanja kotača prema van, dok ako se nalazi ispod razine tla „uvlači“ ga unutar vozila.

### 3.1.3. Bočni pogled na geometriju ovjesa

Bočni pogled na geometriju ovjesa (engl. *side view swing arm*) služi za prikaz gibanja i sila pri horizontalnom kretanju vozila, pri tome se misli na ubrzavanje i usporavanje vozila. Standardne značajke koje se promatraju su tzv. anti-značajke te horizontalno kretanje kotača uslijed hoda kotača koje je zavisno o postavljenoj statičkoj geometriji. Pod anti-značajke se podrazumijeva sljedeće:

- engl. *anti-dive*; to je značajka koja omogućuje manje poniranje prednjeg dijela vozila pri kočenju,
- engl. *anti-lift*; značajka koja ukazuje na to koliko se podiže zadnji dio vozila pri kočenju,
- engl. *anti-squat*, značajka koja omogućuje manje kretanje zadnjeg dijela vozila prema dolje uslijed ubrzavanja.

Ove značajke nemaju adekvatan hrvatski naziv stoga će se i za značajke koristiti engleski nazivi. Kao i do sada iznosi i promjene tih značajki je ovisno o položaju trenutnog središta rotacije s time da položaj može kao i do sada biti bilo gdje, iznad ili ispred kotača, iznad ili ispod centra kotača s time da je samo potrebno unaprijed odrediti željene parametre, to se posebice odnosi na anti-značajke.

Anti-značajke kao što je već rečeno služe za kontroliranje horizontalnog gibanja vozila te samim time povezuju i određuju prijenos sila između ovješene i neovješene mase



vozila. Rezultati tog horizontalnog gibanja u bočnom pogledu i iskazuju se u kutovima jer se kontrolira naginjanje vozila. Potrebno je reći da geometrija koja posjeduje anti-značajke ne utječe na vozilo kada je u statičkom položaju, odnosno kada miruje. Anti značajke se još iskazuju u postotcima, odnosno koliki postotak će sama izvedba geometrijska konstrukcija prenijeti a koliki će dio opterećenja prenijeti opruga koja je ustvari jedini aktivni element koji služi za ublažavanje i smanjenje vibracija.

Prva značajka je anti-dive. Ona se odnosi na prednji dio vozila, odnosno na prijenos sile kočenja na prednjoj osovini. Izražava se u postocima kada se općenito spominje, dok se proračunski izražava u obliku kuta, te taj iznos znači koliko će se sile kočenja prenijeti konstrukcijom ovjesa, dok će ostatak prenijeti opruga. Ona omogućuje manje poniranje vozila prema naprijed pri kočenju što je povoljno sa aspekta da vozilo pri usporavanju proizvodi što manje poremećaja i da se ne mijenja hod kotača, a time i položaj trenutnog središta rotacije, jer se time utječe na stabilnost vozila, slika 10. Iznos anti-dive-a se računa prema niže navedenom izrazu.

$$\% anti - dive = \frac{m * \left(\frac{a_x}{g}\right) * p_F * \left(\frac{H_F}{L_F}\right)}{m * \left(\frac{a_x}{g}\right) * \left(\frac{h}{l}\right)} = p_F * \tan \phi_F * \frac{l}{h}$$

$m$  = masa vozila,  $[kg]$

$a_x$  = uzdužno ubrzanje,  $[m / s^2]$

$p_F$  = prijenosni omjer kočione sile na prednje kotače,  $[\%]$

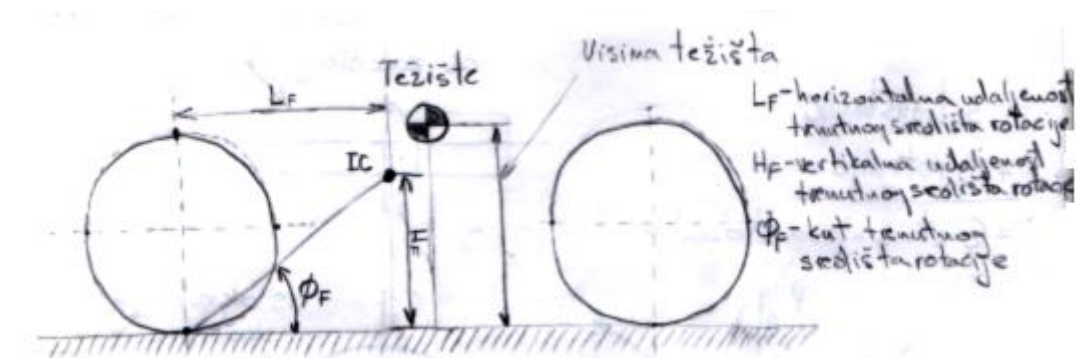
$\phi_F$  = kut trenutnog središta rotacije za prednji kotač,  $[\circ]$

$l$  = međuosovinski razmak,  $[mm]$

$h$  = visina težišta,  $[mm]$

$H_F$  = visina trenutnog središta rotacije za prednji kotač,  $[mm]$

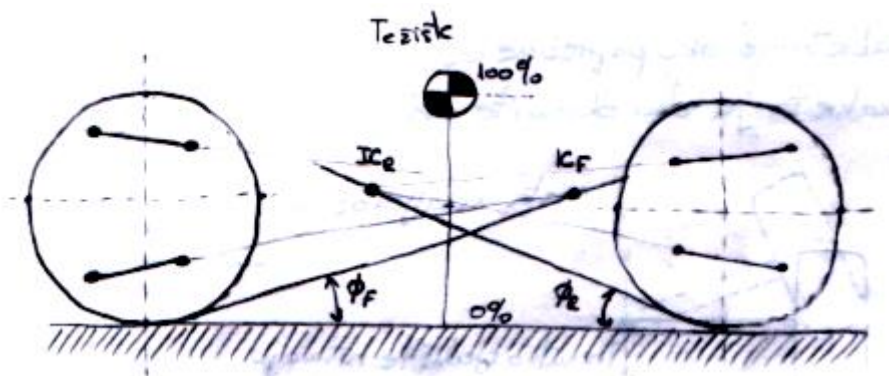
$L_F$  = horizontalna udaljenost trenutnog središta rotacije za prednji kotač,  $[mm]$



Slika 10. Anti-dive

Položaj trenutnog središta rotacije u ovom slučaju se određuje na sljedeći način: kroz točke vodilica koje su spojene sa vozilom se provuče pravac, to vrijedi za obje vodilice i

tamo gdje se vodilice sijeku nalazi se trenutno središte rotacije. No da bi se odredio iznos anti-dive značajke potrebno je ucrtati položaj težišta vozila te povući pravac



Slika 11. Određivanje iznosa anti-značajki

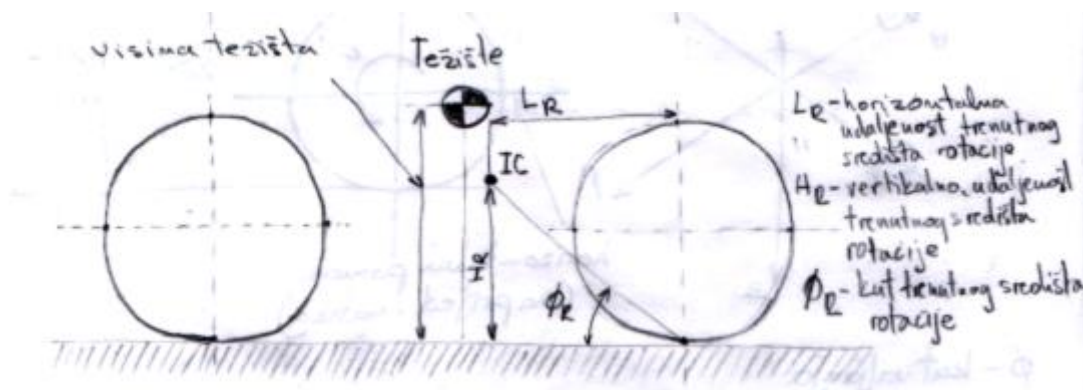
između trenutnog središta rotacije i kontakta kotača i podloge. Tamo gdje pravac siječe liniju visine težišta vozila se može odrediti iznos značajke, slika 11. Ista procedura vrijedi i za ostale dvije značajke, samo se provodi od stražnjeg kotača. Razlika je u izrazima prema kojima se to može izračunati, prema niže navedenom izrazu i slici 12. .

$$\% antisquat = \tan \phi_R * \left( \frac{l}{h} \right) * 100$$

$\phi_R$  = kut trenutnog središta rotacije za stražnji kotač,  $[\circ]$

$l$  = međuosovinski razmak,  $[mm]$

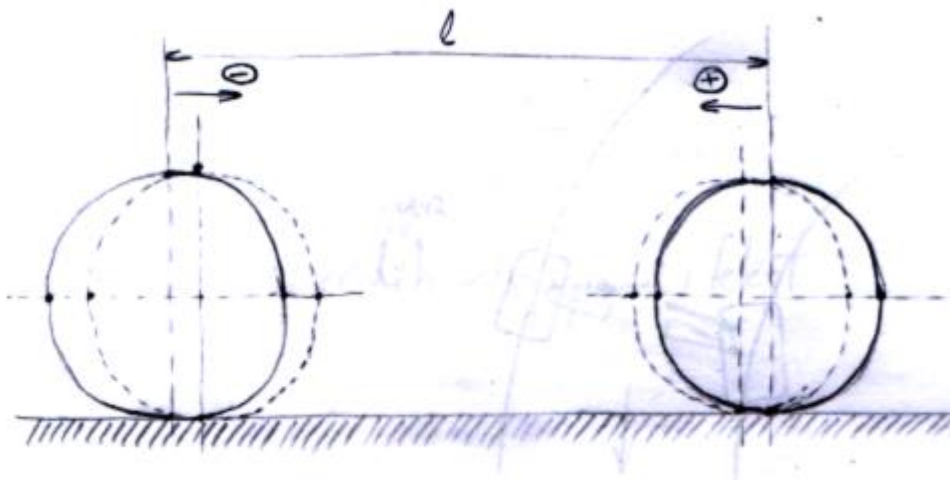
$h$  = visina težišta,  $[mm]$



Slika 12. Anti-squat

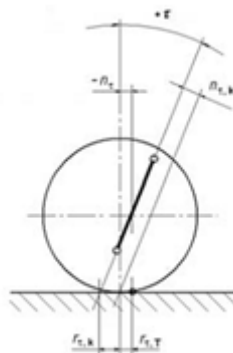
Iznos sile kočenja koja se prenosi na kotače direktno je zavisna o omjeru kočenja koje je postavljeno na vozilu. Iznosi značajki su uvijek pozitivni i kreću se između 0 % i 100 %. Iznos ovisi o tome koliko se želi da vodilice ovjesa prenose sile uslijed horizontalnog kretanja vozila. Preporuke koje se koriste za trkaća vozila će biti naknadno navedene.

Značajka koja se također promatra u ovome pogledu i koja se mijenja uslijed hoda kotača je horizontalno kretanje kotača, a pri tome se misli na promjenu međuosovinskog razmaka kotača uslijed hoda kotača. Kao i sve do sada, ova značajka je ovisna o položaju trenutnog središta rotacije, odnosno o njegovoj udaljenosti od centra kotača. Kao i kod bočnog nagiba kotača, što je udaljenost veća to je promjena manja i obratno, slika 13.



Slika 13. Promjena međuosovinskog razmaka

Značajka čija promjena je još vidljiva iz ovog pogleda je uzdužni nagib osi zakretanja kotača (engl. *caster angle*), slika 14. Promjena ove značajke je u potpunosti ovisna o udaljenosti trenutnog središta rotacije. Ova značajka služi isključivo zbog olakšavanja upravljanja vozila no njezina promjena nije poželjna, ukoliko je prisutna, potrebno je da bude što manja.

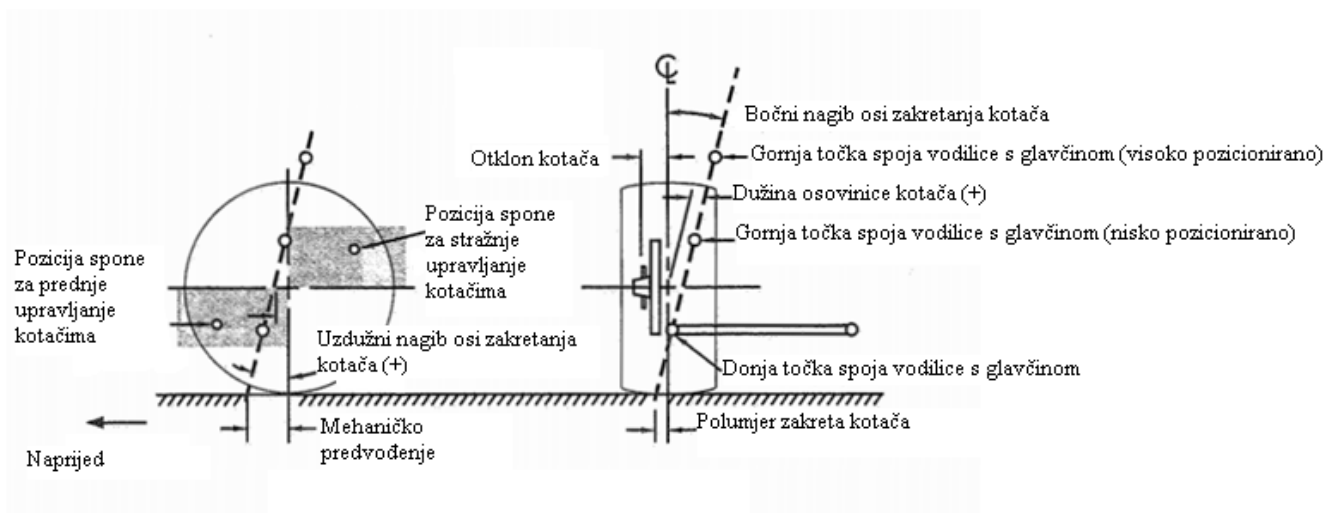


Slika 14. Uzdužni nagib osi zakretanja kotača[7]

### 3.2. Zahtjevi za konstruiranje ovjesa

Pri dizajniranju ovjesa prije svega je potrebno napraviti listu zahtjeva koji se ne mogu mijenjati, točnije ako postoje neke propisane norme ili standard prema kojima ovjes treba biti izveden, slika 15. prikazuje parametre koje treba imati u vidu pri konstruiranju ovjesa, jer pri tome treba moći posložiti sve elemente smisleno. Tokom ovog poglavlja će se govoriti o prednjem ovjesu ponajviše, dok za stražnji ovjes vrijedi sve obratno, osim određenih parametara koji će biti posebno naglašeni ukoliko se razlikuju. Prva točka koju se može u startu odrediti je veličina pneumatika, naplatak, veličina kočnog

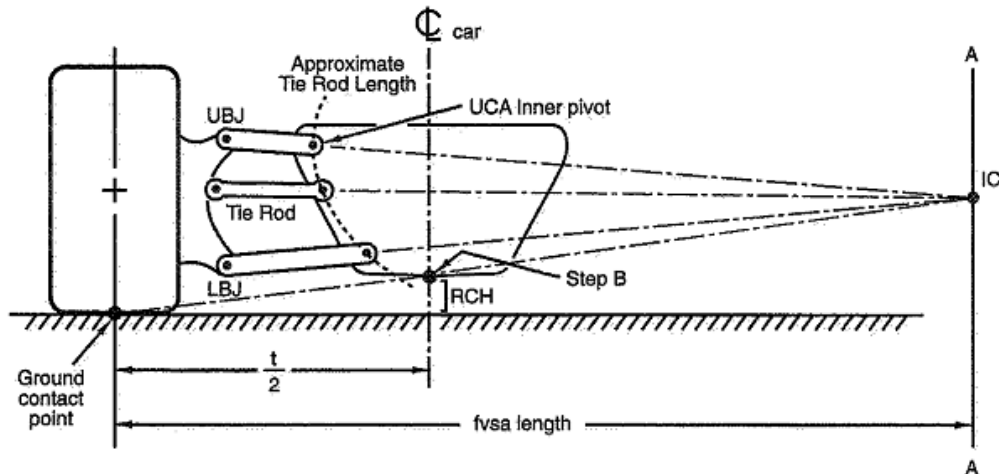
elementa i ležajevi na kojima će sve to stajati. Sa ovim elementima se može odrediti koliki treba biti trag kotača ili se barem u startu može ograničiti dizajn ostalih elemenata i parametara kojima se opisuje geometrija.



Slika 15. Parametri ovjesa

Nakon što je određena pozicija kotača i ostalih navedenih elemenata, kreće se u konstruiranje samog ovjesa, točnije položaja vodilica kako bi se postigla potrebna geometrija. Prvo se spojna točka donjeg ramena i glavčine postavlja najdublje i najniže što se može postaviti iz konstrukcijskih razloga, kako bi se omogućilo što više prostora i mjesta da disk kočnice i zadovolji uvjet što veće dužine vertikalne osi zakreta kotača (engl. *kingpin axis*). Sljedeća točku koju treba postaviti je bočni nagib osi zakreta kotača (engl. *kingpin inclination*). S obzirom da je ona u direktnoj vezi sa polumjerom zakreta kotača i duljinom osovinice kotača potrebno je učiniti kompromis. Kompromis je taj da je potrebno odlučiti što je bitno kako bi se dobile zadovoljavajuće karakteristike. S obzirom da se u ovome radu govori o vozilu koje ima stražnji pogon, preporuka nalaže da kut nagiba vertikalne osi kotača treba biti što manji, odnosno ne veći od  $8^\circ$  te prihvatiti polumjer zakreta kotača kakav je[3]. Bočni nagib osi zakreta kotača ima veliki utjecaj na upravljanje vozila, stoga treba uzeti u obzir da što je on veći to će se više kotač podignuti pri skretanju. Sljedeća stavka je bočni nagib kotača, njegova promjena je isto tako ovisna o kutu uzdužne osi kotača kao i o uzdužnom nagibu osi zakreta kotača. Ukoliko niti jedan od ovih parametara nije zadan, odnosno jednak je nuli, promjene uzdužnog nagiba kotača nema. Ukoliko je samo zadan kut uzdužne osi zakreta kotača, tada će na vanjskome kotaču pri skretanju doći do pojave pozitivnog bočnog nagiba kotača što nikako nije prihvatljivo. Stoga, je potrebno zadati i kut uzdužnog nagiba osi zakreta kotača kako bi se postigao efekt pojave negativnog bočnog nagiba kotača. Krivulja po kojoj će se kretati bočni nagib kotača je određen dužinom vodilica i na temelju toga se kao što je već rečeno određuje njegova izmjena. Idealna krivulja promjene bočnog nagiba kotača treba s komprimiranjem imati sve progresivniju karakteristiku, no dok se opruga razvlači treba biti što manja promjena. Neki dizajneri pokušavaju postići da se kotač giba u negativnom smjeru kada se komprimira opruga, a dok se opruga razvlači da se pokuša postići da kotač dođe u pozitivan kut uzdužnog nagiba kotača[3]. Pozicija letve upravljača je definirana slikom 14., točnije ukoliko je pozicija spone predviđena da bude naprijed potrebno ju je ugraditi nisko ispred centra kotača, dok ukoliko se ugrađuje na višem mjestu vozila,

potrebno ju je ugraditi iza centra kotača. Kako bi došlo do smanjenja promjene usmjerenosti kotača (engl. *toe in/out*) potrebno je zadovoljiti sljedeći uvjet: točka spoja spone sa glavčinom treba biti usmjerena u smjeru presjecišta trenutnog središta rotacije u prednjem pogledu, slika 16.

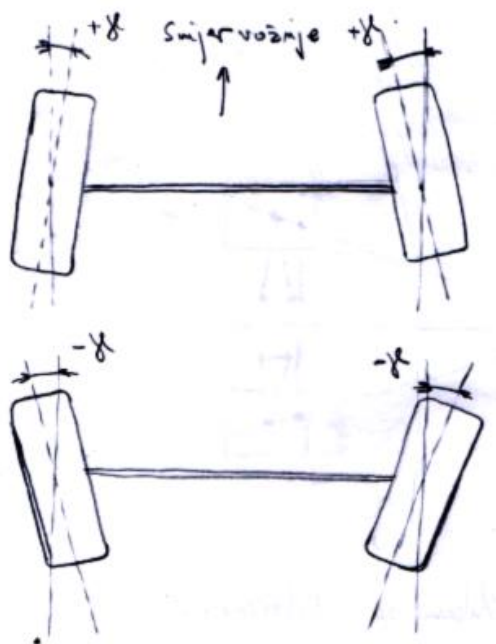


- Step A—Establish front view swing arm length (line A-A)
- Step B—Establish roll center location and project from ground contact point through RC to line A-A, establishing IC
- Step C—Project lines from outer ball joints to IC
- Step D—Choose control arm lengths to get inner pivot locations
- Step E—Connect tie rod outer pivot to IC
- Step F—Establish tie rod length.

**Figure 17.18** SLA front view geometry.

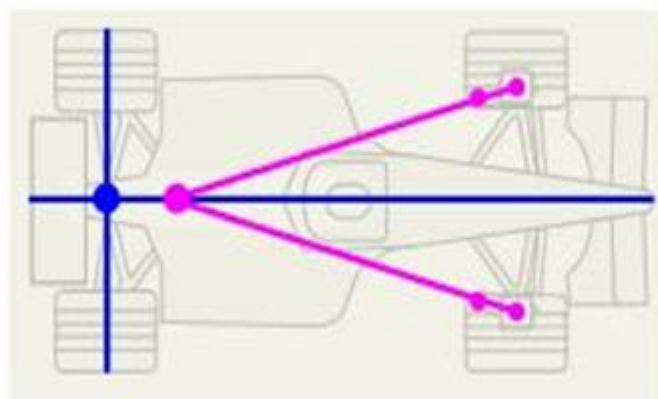
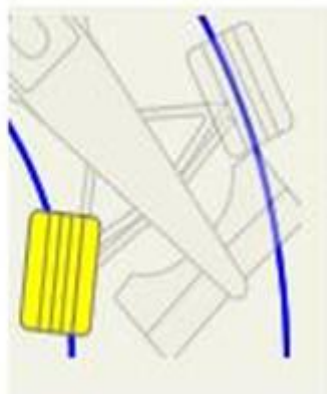
*Slika 16. Određivanje pozicije spone*

Na ovaj način se izbjegava promjena usmjerenosti kotača za vrijeme hoda kotača. Usmjerenošću kotača se može utjecati na upravljivost vozila, slika 17.



*Slika 17. Usmjerenost kotača*

Upravlјivost bolida je određena Ackermannovim kutom. Ackermannov kut se određuje na temelju namjene vozila. Postoje dvije vrste Ackermannovog sustava upravlјanja, pravi Ackermann i obrnuti Ackermann. Pravi Ackermann se uglavnom koristi kod osobnih vozila s obzirom da oni nemaju potrebe za svladavanjem većih opterećenja pri prolasku kroz zavoje, najčešće se koristi 100 % Ackermann. Kod vozila kod kojih je stabilnost pri velikim brzinama bitna koristi se obrnuti Ackermann (koristi F1), dok recimo u ovom slučaju, točnije slučaju Formule Student potrebno je koristiti standardni Ackermann ali sa manje od 100% vrijednosti, tzv. pod-Ackermann. Takav sustav upravlјanja je potrebno koristiti samo iz razloga što se vozilo formule student ne kreće visokim brzinama te je potrebna okretljivost i agilnost zbog što boljeg i preciznijeg svladavanja propisanih procedura. Takav sustav se odlikuje time da se unutarnji kotač zakreće više nego vanjski kotač u zavoju, te time omogućava preciznije ulaske i prolaske kroz zavoj, slika 18.



Slika 18. Under Ackermann[10]

Stavka na koje je također potrebno obratiti pozornost su anti-značajke. Njihovo definiranje i računanje je već definirano u poglavlju prije no potrebno je navesti vrijednosti koje su poželjne kako bi se dobile zadovoljavajuće performanse vozila. Što se tiče *anti-dive*-a preporučeno je da geometrija ovjesa prenosi do 30% opterećenja, dok u slučaju *anti-squat*-a neka taj iznos bude do 40%.

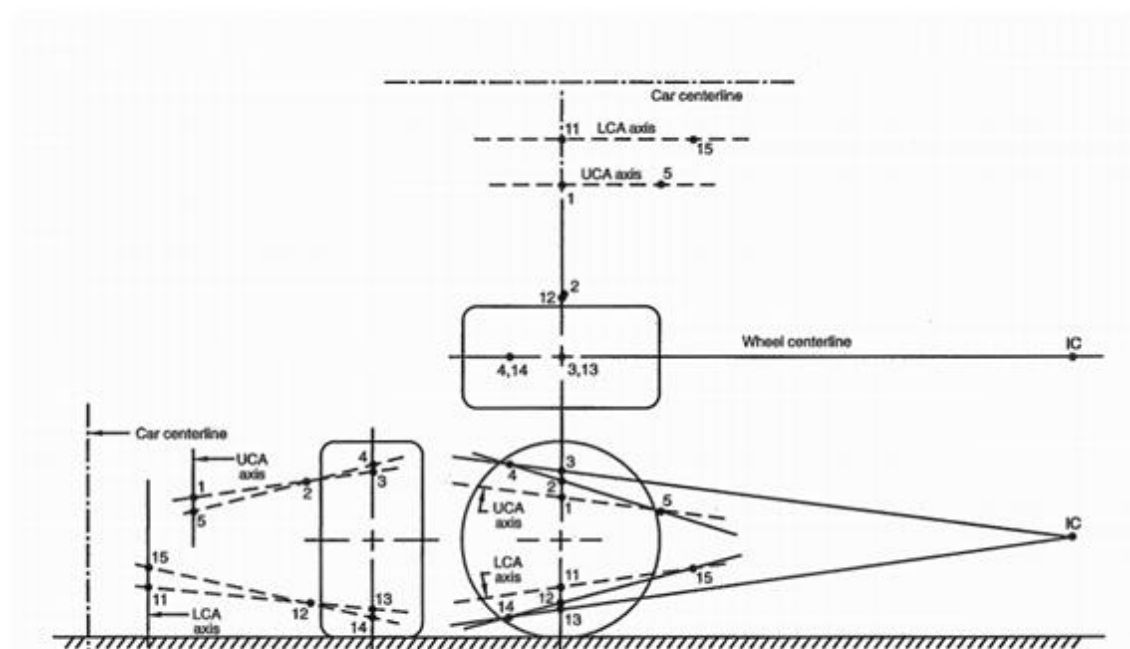
### 3.2.1. Grafička metoda

U ovome poglavlju će biti opisana grafička metoda[3] određivanja točaka ovjesa, slika 19. Grafička metoda koju se može koristiti pri dizajniranju ovjesa je sljedeća; treba odrediti dimenziju kotača koja će biti korištena te je potrebno odrediti ravnine gdje će se elementi ovjesa spajati sa okvirom. Potrebno je odrediti širinu traga kotača. Nakon toga je potrebno u mjerilu nacrtati te zadane elemente kako bi se dobila što točnija pozicija točaka spajanja., slika 19. je prikaz izvedene metode.

Prvo se određuju pozicije točaka 1 i 2 za gornju vodilicu, odnosno 11 i 12 za donju vodilicu. Pozicije tih točaka se određuju na temelju trenutnog središta rotacije u prednjem pogledu. Nakon što su te točke ucrtane kroz njih se provlači pravac i tamo gdje se ti pravci sijeku sa središnjicom kotača tamo se nalaze točke 3 i 13. To su pomoćne točke koje će se u bočnom pogledu iskoristiti za određivanje položaja drugih točaka. Nakon što su definirane ove točke, projicirane su u bočni pogled. Nakon što su



točke projicirane u bočni pogled, potrebno je odrediti položaj trenutnog središta rotacije u bočnom pogledu. Nakon što je definirano trenutno središte rotacije provlači se pravac kroz trenutno središte rotacije i kroz točku 3, odnosno točku 13. Na tom pravcu nekoliko milimetara dalje definira se točka 4, odnosno 14. Te točke trebaju biti u istoj ravnini kako bi se dobila odgovarajuća geometrija te se njima određuje kut nagiba vodilica, a time se direktno utječe na udaljenost trenutnog središta rotacije i brzinu promjene iznosa anti-značajki. Te točke su projicirane natrag u prednji pogled. Nakon toga se provlače pravci kroz točke 4 i 2, odnosno 12 i 14, te se dobivaju točke 5 i 15. One se nalaze na presjecištu sa ravinom gdje se nalaze točke 1 i 11. Te točke se ponovno projiciraju natrag u bočni pogled te se provlači pravac kroz točke 1 i 5 i 11 i 15. Nakon što je napravljen taj korak definirani su položaji svih potrebnih točaka ovjesa. Doduše, geometriju je moguće prilagođavati na taj način da se točke 1 i 5 i točke 11 i 15 pomiču po pravcu koji prolazi kroz njih. Time se neće ugroziti dobivene karakteristike, ali će se moći prilagoditi konstrukcija ovjesa.



Slika 19. Grafička metoda crtanja točaka ovjesa

## 4. Programski paketi za analizu kinematike i dinamike vozila

Aplikacije koje će se spominjati u ovome radu su CarSIM i Lotus Suspension Analysis. U aplikaciji CarSIM se mogu ispitivati dinamička svojstva vozila u realnom vremenu koristeći pri tome različite procedure. Da bi se dobila kinematska svojstva vozila za odabranu konstrukciju, potrebno je koristiti aplikaciju Lotus Suspension Analysis jer se pomoću nje mogu dobiti potrebne značajke vozila kako bi se mogao opisati matematički model u CarSIM-u.



## **4.1. CarSIM**

CarSIM je aplikacija pomoću koje se uz pomoć matematičkog modela može provesti dinamička analiza vozila, bez obzira na vrstu vozila. Rezultate je moguće vidjeti pomoću dijagrama i pomoću animacija, a broj varijabli koji je moguće ispitivati je vrlo velik (oko 700 različitih varijabli).

Matematički model koji je moguće opisivati i analizirati se unosi pomoću parametara te uključuju podatke koji se mogu izmjeriti od strane proizvođača ili dobavljača. Osim opisivanja vlastitih modela moguće je koristiti i generičke modele vozila, točnije korištenje baze podataka same aplikacije.

Podatke je moguće i samostalno mjeriti pomoću raznih aplikacija, najčešće korištena je LabVIEW jer omogućuje laku prilagodbu na vozilu, dok je CarSIM moguće i kombinirati sa MATLAB-om, odnosno Simulink-om.

Osim matematičkih modela vozila moguće je unositi i vlastite ispitne procedure, mada u samoj aplikaciji postoji već veliki broj ispitnih procedura, moguće je modelirati vlastite staze i procedure prema kojima bi se moglo ispitivati vozilo.

### **4.1.1. Izrada matematičkog modela**

Matematički model u CarSIM-u kao što je već rečeno se opisuje pomoću parametara koje unosi korisnik koje je dobio mjerenjem, izračunom ili pomoću neke druge aplikacije (u ovom slučaju će to biti aplikacija Lotus Suspension Analysis samo za parametre ovjesa), a nakon unosa podataka i pokretanja simulacije, simulacijski software VehicleSIM rješava jednadžbe kojima se opisuje dinamičko ponašanje vozila.

Moguće je kao što je već i rečeno stvaranje kompleksnijih ispitnih procedura, koje su ujedno ovisne i o ulaznim varijablama jer je tako moguće onda napraviti "slijed događaja".

Jednadžbe kojima je opisano dinamičko ponašanje vozila vrijedi za nelinearna kretanja krutog tijela u prostoru. Kinematika i svojstva ovjesa određena su veličinama koje je moguće direktno mjeriti, što nam ukazuje na mogućnosti, odnosno utjecaj na ishod rezultata nakon simulacije i poistovjećenje matematičkog modela i realnog modela što je i konačni cilj. Većina komponenta čije veličine su mjerljive su prikazane kao tablice nelinearnih podataka, time se misli na modele opruga, kinematskih karakteristika i ostalih komponenti ponajviše vezanih za ovjes. Osim ovjesa moguće je opisati i značajke pneumatika koje isto imaju veliku ulogu u rezultatima i ponašanju vozila. Pneumatike je isto moguće odabirati iz već unaprijed definirane baze, no moguće je i definirati vlastite pneumatike.

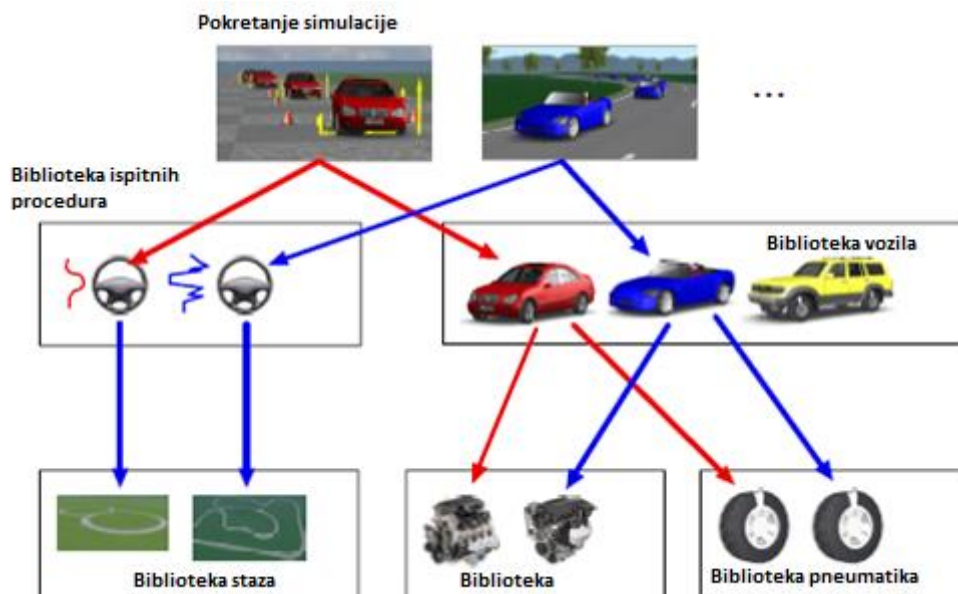
### **4.1.2. Sučelje aplikacije CarSIM**

Pri pokretanju aplikacije na samome početku je potrebno odabrati bazu podataka koja će se koristiti za rad. Stvarna baza podataka je samo jedna, no zbog stalnih izmjena postojećih i novih modela preporuča se napraviti kopiju te baze kako bi se uvijek moglo pristupiti izvornim podacima. Nakon odabira baze podataka otvara se početni prozor u kojem je moguće vidjeti radno sučelje, okolinu preko koje se unose ulazni podaci, pokreću simulacije i pregledavaju rezultati.



Slika 20. Izgled sučelja aplikacije

Baze podataka u CarSIM-u je moguće podijeliti na tri dijela, odnosno na skup podataka (engl. *dataset*), biblioteku (engl. *library*) i bazu podataka (engl. *database*). Kroz ova tri dijela se gotovo uvijek prolazi pri unosu podataka ili odabiru nekog generičkog modela vozila. Ova procedura se odnosi i na odabir ispitne procedure, kao i ostalih elementa koje je potrebno ili moguće dodatno ili naknadno mijenjati.



Slika 21. Slijed odabira baze podataka

Skupovi podataka su međusobno povezani sa poveznicama (engl. *data links*). Ove poveznice omogućavaju brz i jednostavan odabir skupa podataka unutar nekog drugog skupa podataka. (Primjer: u skupu podataka za vozilo pomoću poveznica je moguće brzo i jednostavno odabrati motor te pristupiti skupu podataka za isti.)

Biblioteke se mogu ugrubo podijeliti u tri grupe:

1. svojstva vozila (aerodinamika, kočioni sustav, ovjes, pogonski sustav, upravljanje, gume i kotači, itd.)

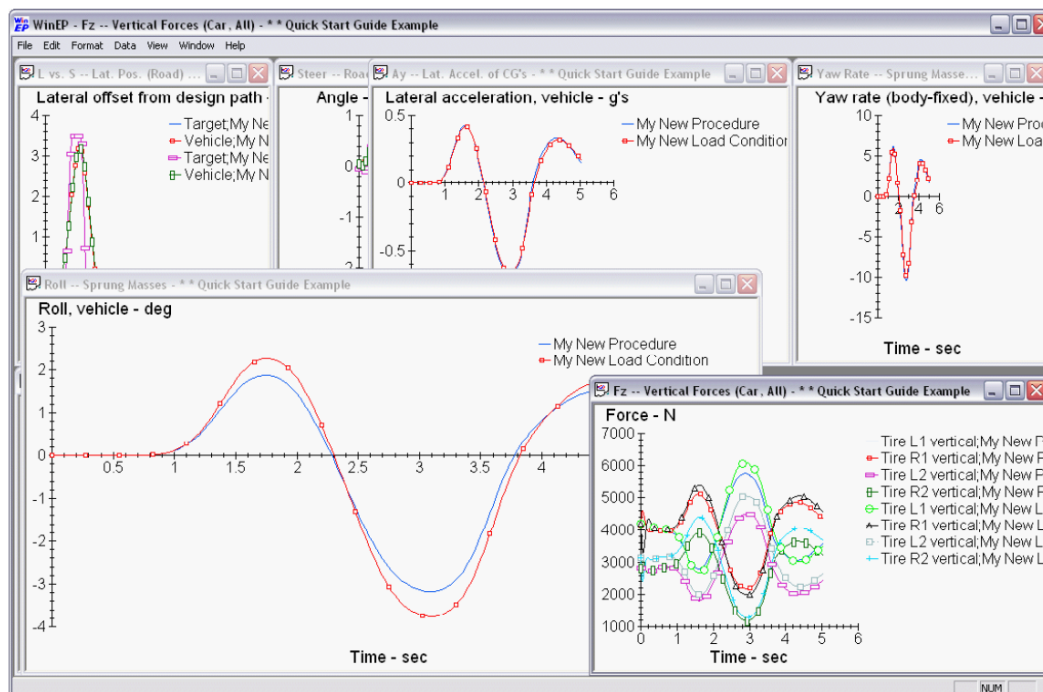
2. vanjski utjecaji na vozilo (konfiguracija terena, kontroliranje vozila, vjetar, itd.)
3. virtualni senzori koje je moguće rasporediti po modelu vozila

Simulacijski model se gradi pomoću biblioteka koje definiraju svojstva vozila i vanjske utjecaje na vozilo. Virtualni senzori nisu nužni za izradu simulacijskog modela.

Potrebno je napomenuti da je moguće pri unosu i modeliranju mijenjati gotovo sve parametre vezane za vozilo, znači može se utjecati ne samo na ovjes već i na ostale dijelove kao što su pogonski sustav, aerodinamika, kočioni sustav itd. Broj varijabli koji je moguće upisati pri opisivanju modela oko 300.

#### 4.1.3. Rezultati dobiveni simulacijom u CarSIM-u

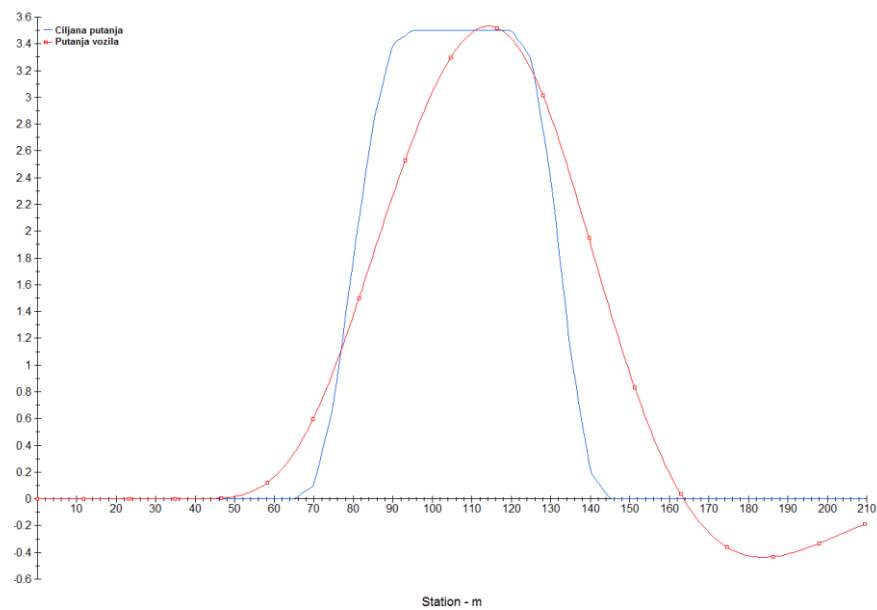
Rezultati se mogu prikazati na dva načina, grafički i animacijom. Grafičkim prikazom je moguće prikazati nekoliko stotina varijabli koje je moguće nezavisno prikazivati jednu o drugoj, dok animacijom se može vidjeti kako se vozilo ponaša tako rekoć u "realnom vremenu", odnosno koje su posljedice određenih postavki vozila.



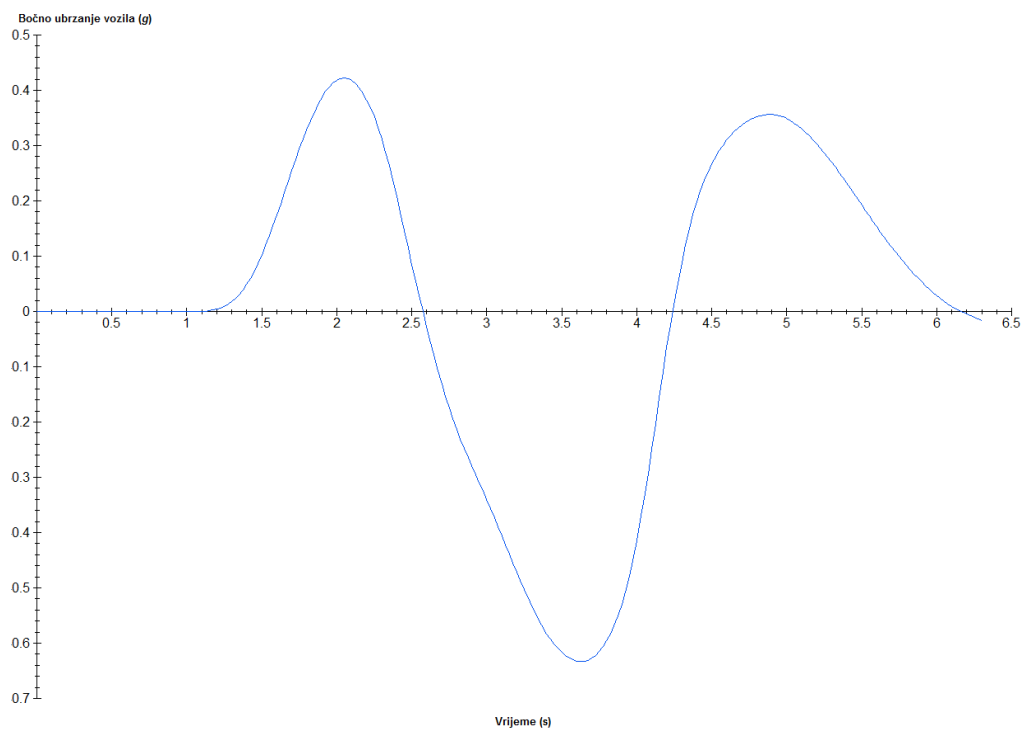
Slika 22. Primjer grafičkog prikaza rezultata

CarSIM automatski generira nekoliko dijagrama, koji se mogu unaprijed definirati za pojedinu ispitnu proceduru posebno na kojima su prikazani rezultati simulacije. Na tim dijagramima su prikazane sile na kotače tijekom simulacije, odstupanje vozila od zadane putanje, zakret volana, bočno (lateralno) ubrzanje, itd.

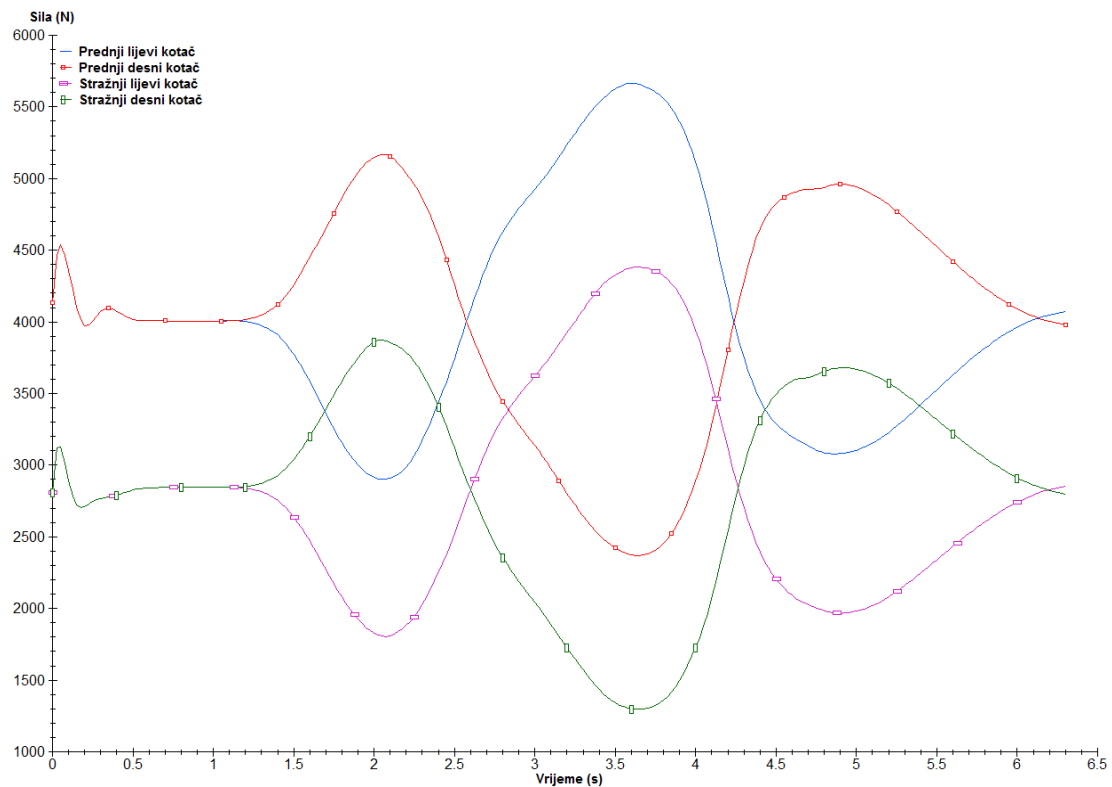
U nastavku će biti prikazani rezultati simulacije dvostruke izmjene pravca za generičko vozilo pri brzini od 120 km/h.



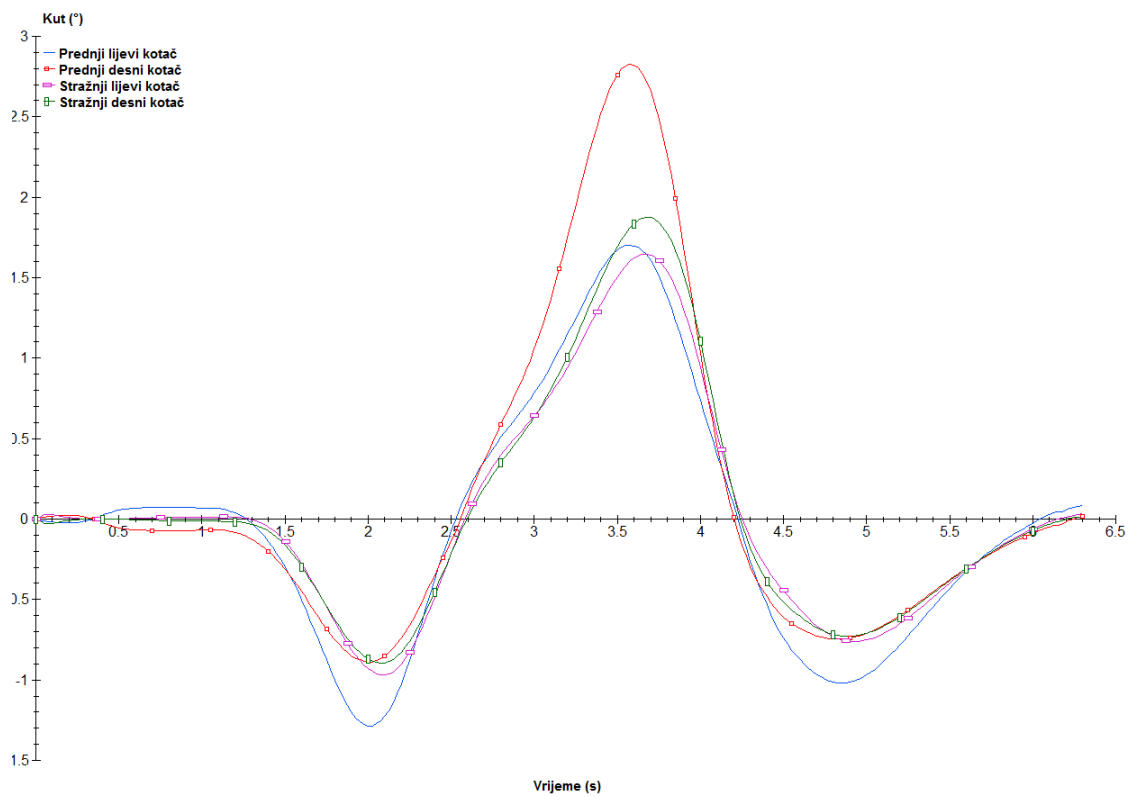
*Slika 23. prikaz odstupanja vozila od zadane putanje*



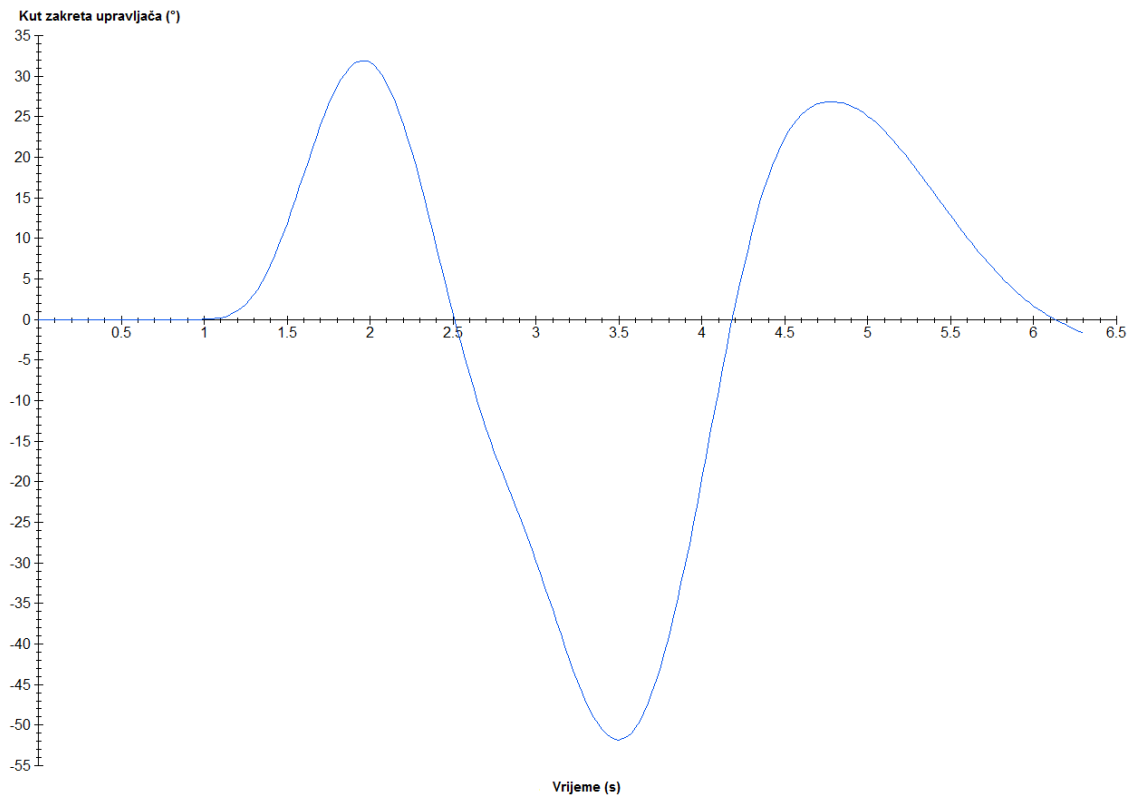
*Slika 24. Prikaz bočnog ubrzanja*



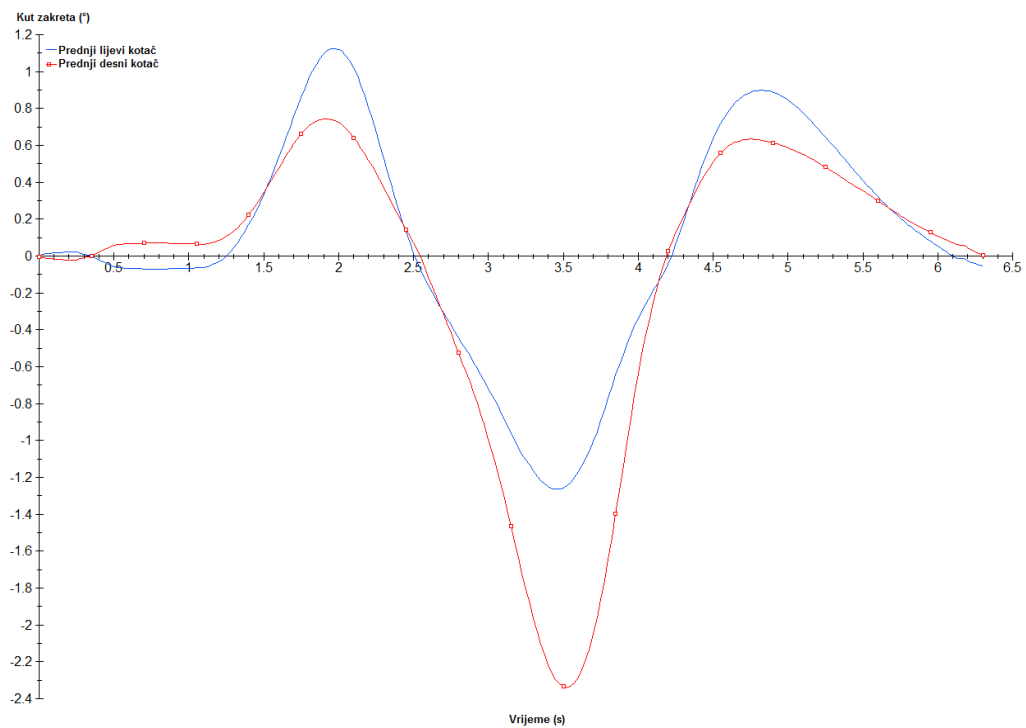
Slika 25. Prikaz promjene vertikalne sile



Slika 26. Prikaz bočnog klizanja svakog kotača posebno



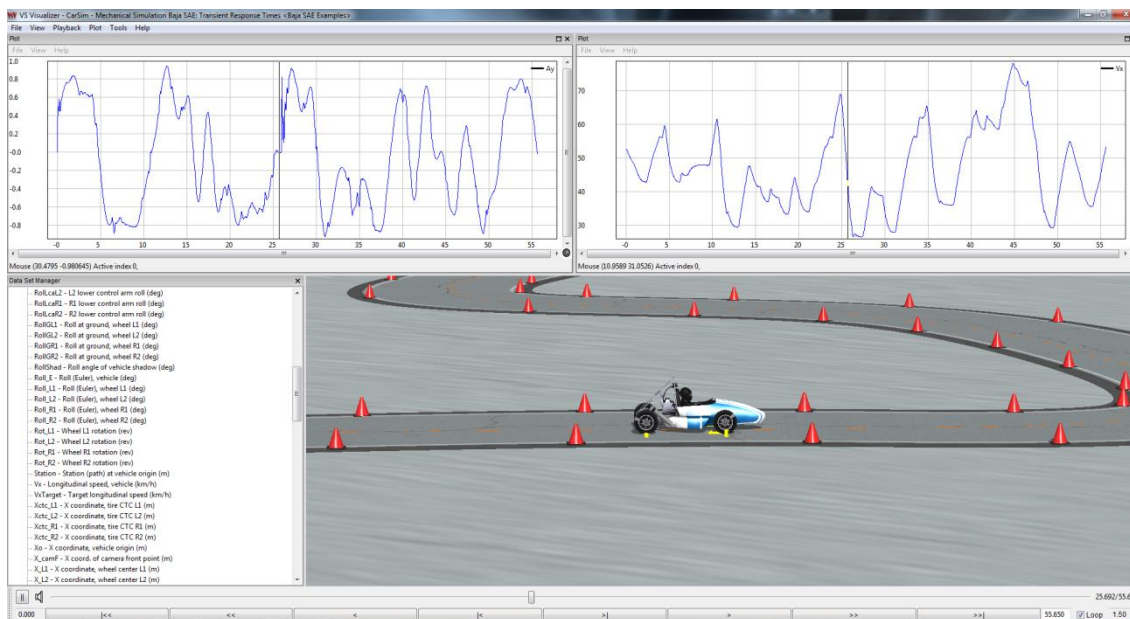
*Slika 27. Prikaz kuta zakreta upravljača*



*Slika 28. Prikaz kuta zakretanja prednjih kotača*

Osim već prikazanih dijagrama, CarSIM omogućuje korisniku kreiranje još pregršt različitih dijagrama iz različitih kategorija – aerodinamika, kočenje, sile na kotačima, brzina, ubrzanje, nagibi oko osi, sile i momenti na pojedinim dijelovima pogonskog sklopa, itd.

Kao što je rečeno na samome početku ovoga poglavlja, rezultate je moguće prikazati i pomoću animacija. U nastavku slijedi primjer Formule Student, točnije njegovog generičkog modela koji se nalazi kao primjer u aplikaciji.



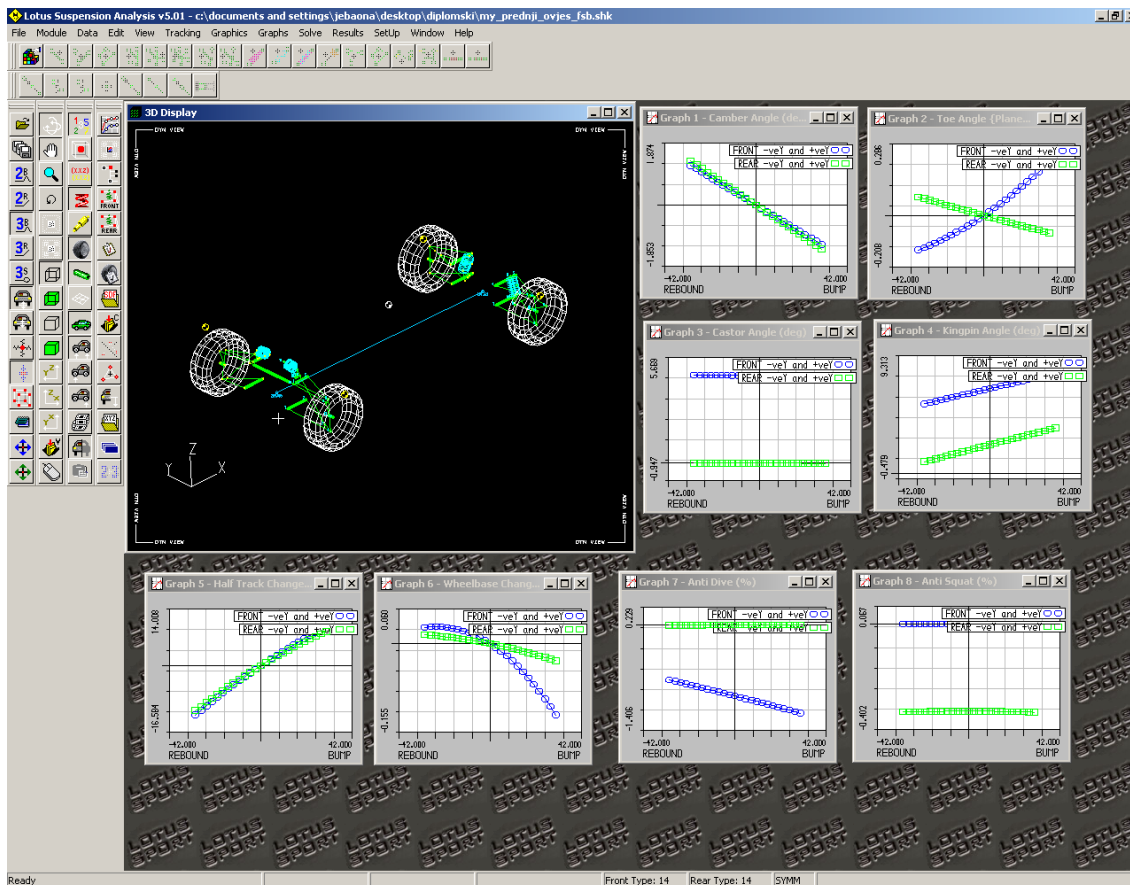
Slika 29. Prikaz animacije

Na slici 29. je moguće vidjeti prozor u kojem se nalazi animacija, moguće je vidjeti i dijagrame koji prikazuju određene, odabrane parametre u realnom vremenu.

S lijeve strane se nalazi popis mjerenih parametara (engl. *Data Set Manager*) iz kojega se mogu izabrati željeni parametri i dodati ih se u dijagrame i moguće je pratiti promjenu parametara za cijelo vrijeme simulacije.

## 4.2. Lotus Suspension Analysis

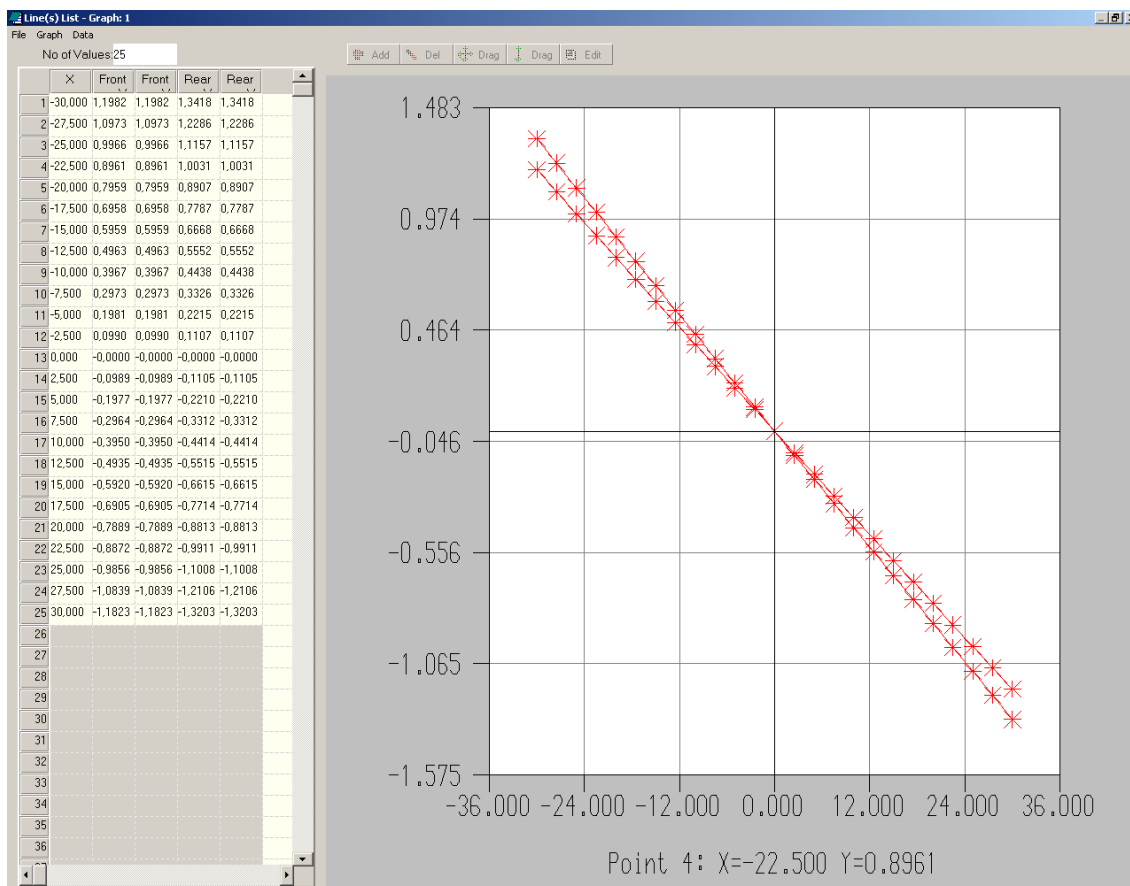
Ova aplikacija se koristi za analizu promjene geometrijskih značajki za zadanu konstrukciju. Unosom poznatih podataka, položaja specifičnih točaka ovjesa dobiva se željena konstrukcija ovjesa. Potrebno je napomenuti da aplikacija ima u sebi već postojeću bazu različitih vrsta ovjesa te je potrebo odabrati potrebi te ga modificirati kako bi se dobila zadovoljavajuća konstrukcija. Početni zaslon je prikazan na Slika 30.



Slika 30. Početni zaslon

Na slici 30. su sa desne strane prikazani dijagrami prema kojima se mogu vidjeti krivulje značajki u ovisnosti o hodu kotača. S lijeve strane su prikazani alati, a u sredini te slike se vidi konstrukcija ovjesa. Vrijednosti za svaku značajku posebno mogu se vidjeti u zasebnom prozoru, slika 31.



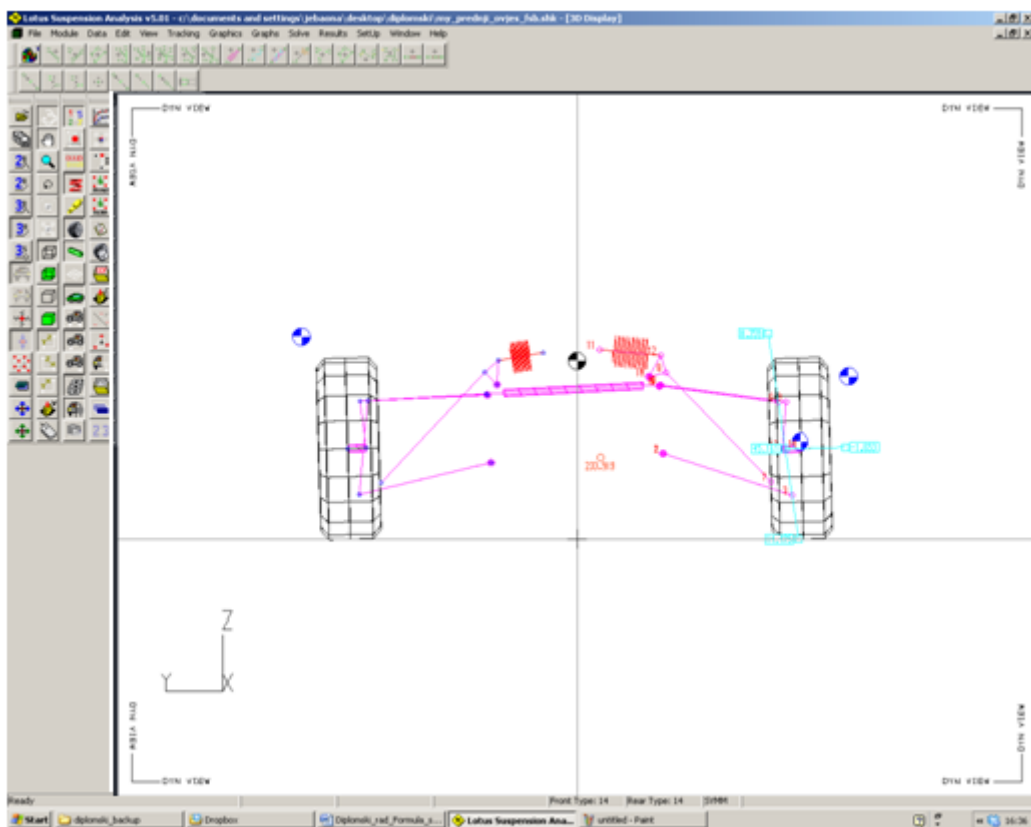


*Slika 31. Prikaz vrijednosti za određenu značajku*

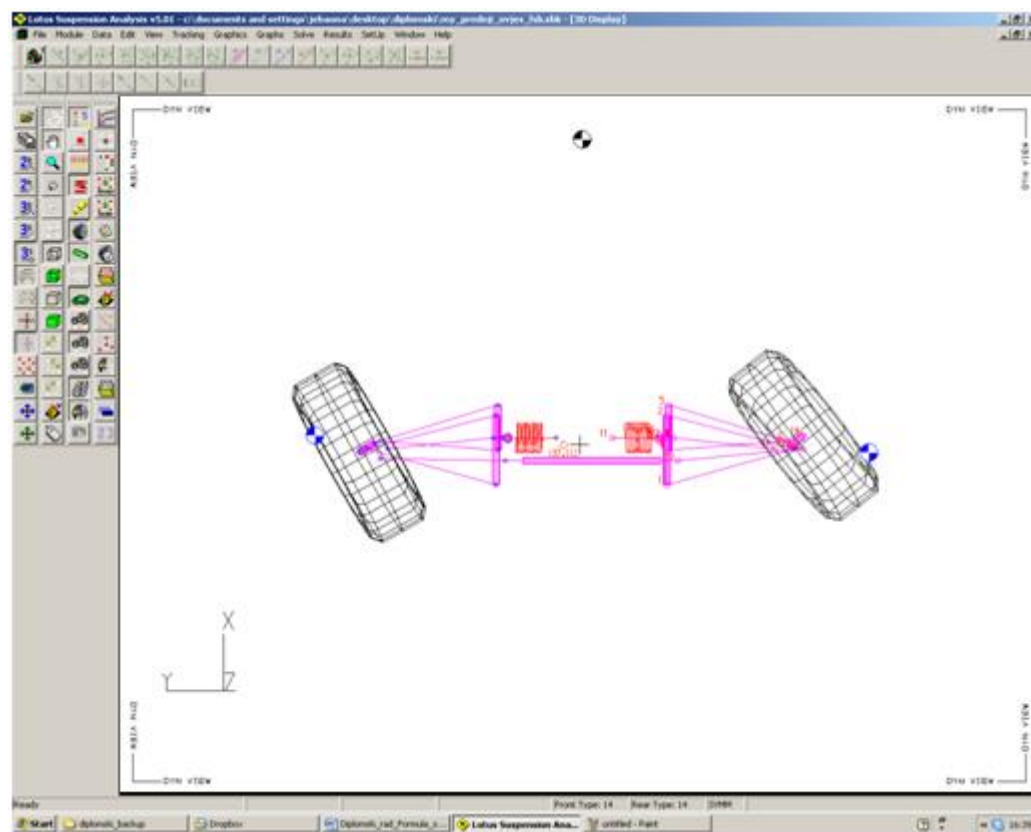
Te vrijednosti se mogu prebaciti u Excel datoteku kako bi se lakše mogle prebaciti u CarSIM aplikaciju, u kojoj će se ti podaci koristiti.

Osim konstrukcijskog i dijagramskog prikaza značajki, u ovoj aplikaciji se još mogu prikazati kako se ponaša vozilo pri njihanju lijevo-desno za određeni kut njihanja (slika 32.) te se može prikazati isto tako promjena značajki vozila pri skretanju lijevo-desno (slika 33).

U ovoj aplikaciji se osim kinematike ovjesa može isto tako ispitati dinamička svojstva vozila, no s obzirom da je CarSIM kao aplikacija nudi više mogućnosti analize ne samo u svijetu Formule student nego i u nekim većim natjecanjima, kao što je Formula 1, WTCC ili DTM automobilske natjecanje odabrana je ona kao ta u kojoj će se testirati dinamika vozila. Drugi razlog tomu je što se u ovoj aplikaciji nalazi samo 4 testne procedure, dok u CarSIM-u postoji vrlo velika baza podataka već generički i postoji mogućnost definiranja novih po potrebi.



Slika 32. Zakretanje vozila oko uzdužne osi



Slika 33. Prikaz zakretanja kotača

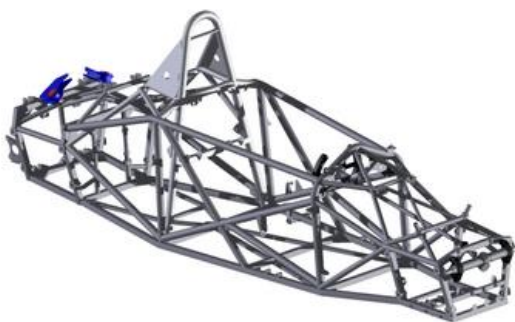
## 5. Izrada simulacijskog modela Formule Student

Za simulacijski model je potrebno skupiti sve moguće već izmjerene podatke koji su potrebni za što bolji opis modela. Vanjske dimenzije modela su izmjerene pri određivanju težišta modela, te su navedene u tablici 1.

*Tablica 1. Vanjske dimenzije vozila*

		FSB Arctos RT04
Širina vozila		1450 mm
Visina vozila(od središta kotača do najviše točke vozila)		1150 mm
Udaljenost središta kotača od poda (prednji lijevi i desni kotač)		260 mm
Udaljenost središta kotača od poda (stražnji lijevi i desni kotač)		260 mm
Udaljenost od poda do podvozja vozila		125 mm
Međuosovinski razmak		1600 mm
Udaljenost od središta prednjeg kotača do stražnjeg dijela vozila		1700 mm
Trag kotača	prednja osovina	1300 mm
	stražnja osovina	1250 mm

Kako bi se dobile kinematske karakteristike ovjesa bolida Formule student potrebno je izmjeriti karakteristične točke ovjesa koje su bitne za samu geometriju ovjesa. To mjerenje je obavljeno u istom trenutku kada je napravljeno mjerenje potrebno za određivanje težišta, te je isto tako napravljena provjera u aplikaciji SolidWORKS u kojoj je napravljen kompletan 3D model Formule Student, (slika 34.). Izmjerene točke će biti prikazane u poglavlju u kojem će se opisivati izrada modela u aplikaciji Lotus Suspension Analysis.



*Slika 34. Šasija bolida*

### 5.1. Mjerenje težišta bolid Formule student

Mjerenje bolid Formule Student je obavljeno u prostorijama Laboratorija za motore i vozila. Mjerna oprema koja se koristi je mjerna vaga: "Intercomp Racing SW500 E-Z Weigh Cabled Scale Systems" na slici 35., te libela (vaser-vaga) sa digitalnim kutomjerom i magnetni tračni metar, slika 36.



Slika 35. Vaga Intercomp Racing 500[4]

Karakteristike vage [4]:

- ❑ Kapacitet po ploči: 700 kg
- ❑ Kapacitet sustava: 2800 kg
- ❑ Točnost: 0.1 %



*Slika 36. Libela i magnetni tračni metar[5]*

Karakteristike libele:

- ❑ Točnost digitalnog kutomjera:  $\pm 0,1^\circ$
- ❑ Točnost ampule: 0,5 mm/m
- ❑ Područje rada: od  $0^\circ$  do  $90^\circ$



*Slika 37. Karakteristike libele[5]*

#### 5.1.1. Proračun težišta

Pri mjerenju su provedena tri mjerenja za tri različita slučaja. Prvi slučaj je kada je vozilo mjereno na horizontalnoj podlozi, a mjerne vage se nalaze ispod svakog kotača vozila (slika 38). Vrijednosti koje su dobivene se nalaze u tablici 2.



*Slika 38. Bolid postavljen na horizontalnu podlogu*

*Tablica 2. Mjerenje bolida na horizontalnoj podlozi*

	Lijevo	Desno	Ukupno
1. vaganje			
Prednja osovina	61 kg	44,5 kg	105,5 kg
Stražnja osovina	62,5 kg	72 kg	134,5 kg
Ukupna masa praznog vozila			240,5 kg
2. vaganje			
Prednja osovina	64,5 kg	41,5 kg	106 kg
Stražnja osovina	59 kg	76 kg	135 kg
Ukupna masa praznog vozila			241 kg
3. vaganje			
Prednja osovina	61 kg	44,5 kg	105,5 kg
Stražnja osovina	62,5 kg	72 kg	134,5 kg
Ukupna masa praznog vozila			240,5 kg

Proračun koji se je proveo se nalazi u prilogu te je korištena aplikacija Mathcad i literatura[3]. Druga dva slučaja se razlikuju u toliko što je jedna od osovina, prednja i li stražnja podignuta na određenu visinu te je mjereno opterećenje na suprotnoj osovini. U tablici 3. se nalaze podaci kada je podignuta prednja osovina i koliko je opterećenje na stražnjoj osovini.



*Tablica 3. Mjerenje opterećenja na stražnjoj osovini*

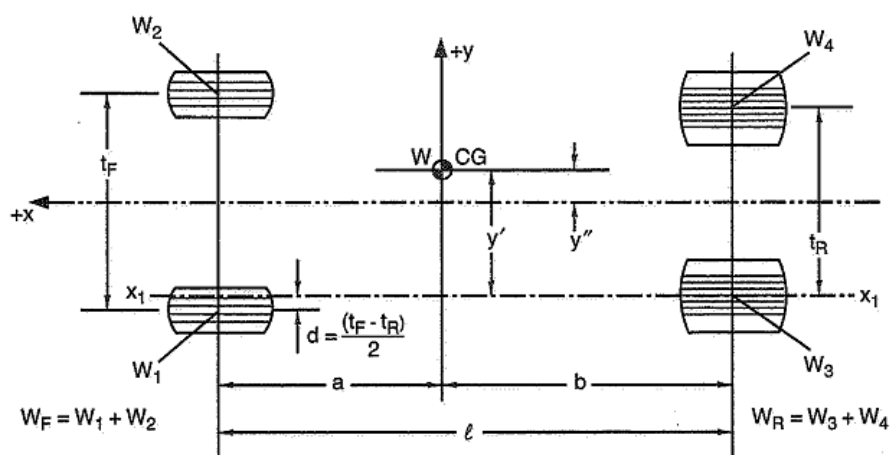
	Lijevo	Desno	Ukupno
1. vaganje			
Stražnja osovina	64 kg	72 kg	136 kg
2. vaganje			
Stražnja osovina	62 kg	74,5 kg	136,5 kg
3. vaganje			
Stražnja osovina	61,5 kg	74,5	136 kg

U tablici 4. se nalaze podaci vezani za mjerenje kada je podignuta stražnja osovina te je mjereno opterećenje na prednjoj osovini.

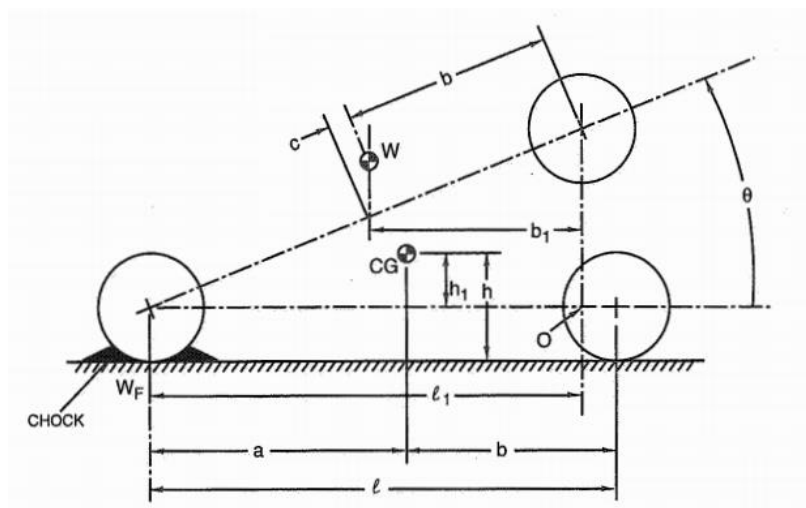
*Tablica 4. Mjerenje opterećenja na prednjoj osovini*

	Lijevo	Desno	Ukupno
1. vaganje			
Prednja osovina	62,5 kg	43 kg	105,5 kg
2. vaganje			
Prednja osovina	63,5 kg	43 kg	106,5 kg
3. vaganje			
Prednja osovina	63 kg	43	106 kg

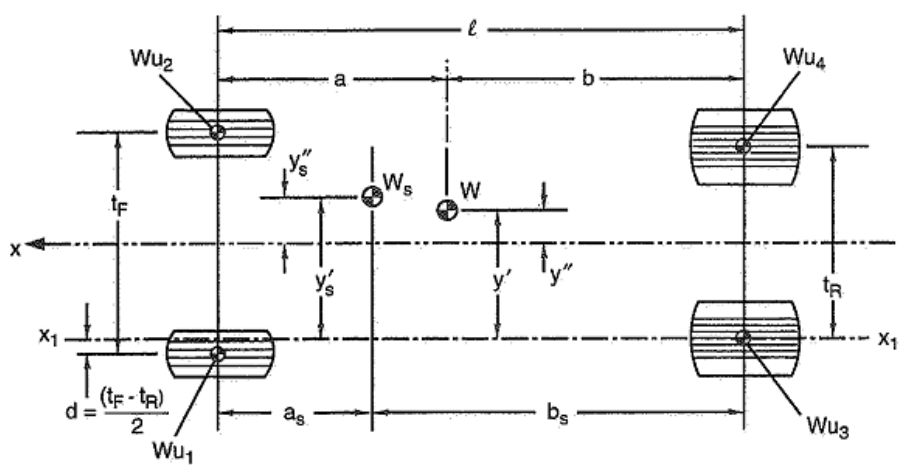
Izrazi koji su korišteni za računanje težišta vozila kao i sam postupak se nalaze u prilogu. Proračun je proveden prema preporuci koja se nalazi u literaturi[3]. Rezultati koji su dobiveni su navedeni u tablici 5., te položaj koordinata težišta se nalazi na slikama 39., 40. i 41.



Slika 39. Položaj  $x$  i  $y$  koordinate težišta praznog vozila[3]



Slika 40. Položaj  $z$ -koordinate težišta praznog vozila[3]



Slika 41. Položaj  $x$  i  $y$ -koordinate ovješene mase vozila[3]

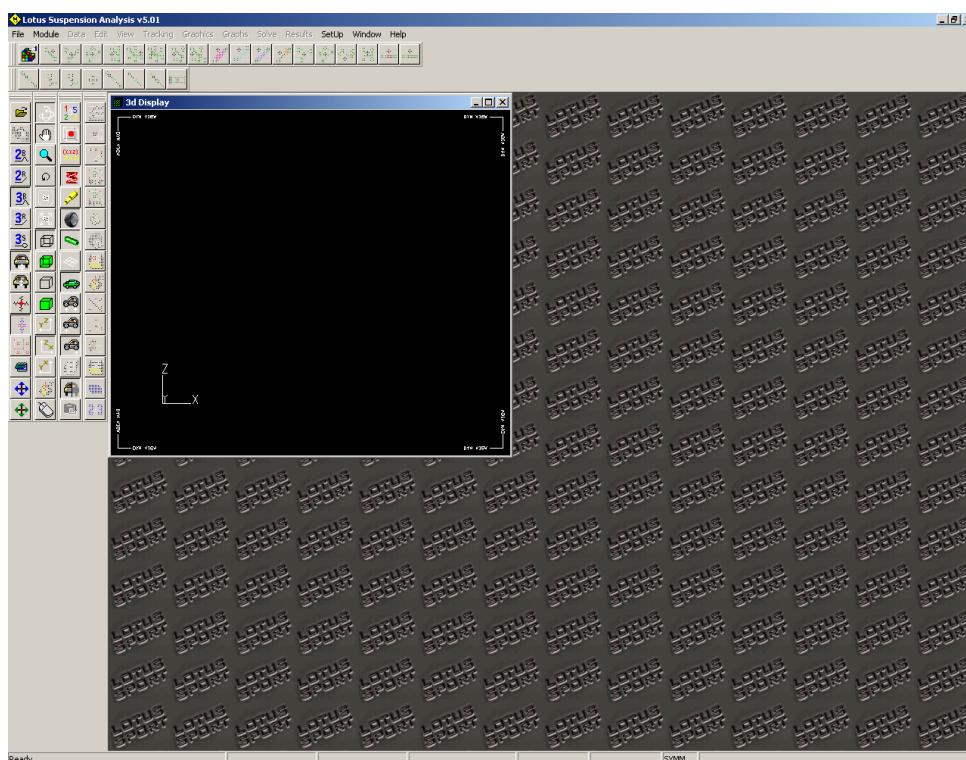


Tablica 5. Rezultati težišta vozila dobiveni proračunom

Masa praznog vozila	
x-koordinata	898,129 mm
y-koordinata	-18,95 mm
z-koordinata	320,461 mm
Ovješena masa	
x-koordinata	917,962 mm
y-koordinata	-24,437 mm
z-koordinata	337,967 mm

## 5.2. Izrada modela u aplikaciji Lotus Suspension Analysis

Kao što je već spomenuto u poglavlju 4.2. ova aplikacije će se koristiti isključivo kako bi se dobile geometrijske karakteristike ovjesa. Na slici 42. je prikazan početni prozor aplikacije. S lijeve strane se nalaze alati koji se koriste pri izradi modela. Pomoću njih se mogu između ostaloga odabrati dijagrami značajki koje se želi promatrati uslijed promjene te je moguće dodatno definirati određene elemente ovjesa. Kao što je već rečeno, postoje tri slučaja u kojima se promatraju promjene značajki, kada se vozilo njiše (engl. *roll*), kada se zakreću prednji kotači (engl. *steer*) i kada se kotači kreću gore dolje (engl. *bump*), slika 43. Alati koji se koriste su uokvireni na slici 43. U tekstu će se zbog pojednostavljena koristiti akronim LSA koji predstavlja skraćenicu od Lotus Suspension Analysis.

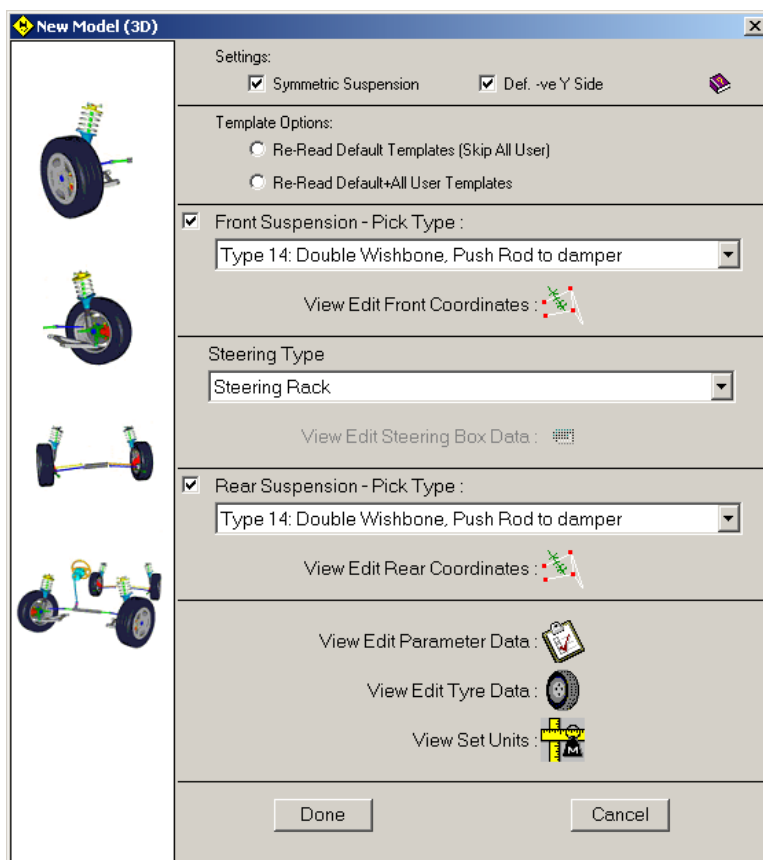


Slika 42. Glavno sučelje aplikacije LSA



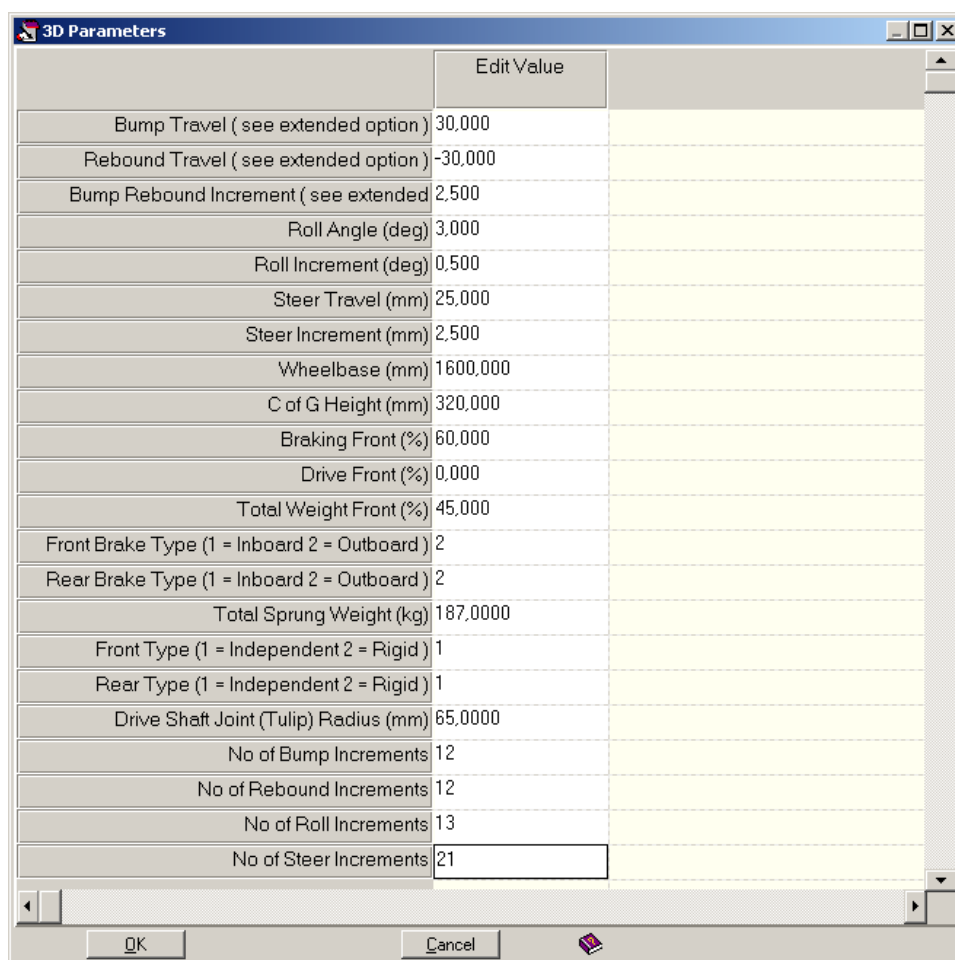
Slika 43. Alati LSA

Da bi se izradio model u ovoj aplikaciji potrebno je iz postojeće baze odabrati tip ovjesa, u ovome slučaju je to ovjes sa dvostrukim poprečnim vodilicama i klackalicom (engl. *Double wishbone, Pushrod to damper*). Takav tip ovjesa se koristi i za prednji i za stražnji ovjes, slika 44.



Slika 44. Izbornik za odabir vrste ovjesa

Na slici 44. je moguće odabrati i dodatni izbornik (engl. *view edit parameter data*) u kojem se određuju dodatni parametri, kao što su hod kotača, njihanje vozila te koliko se može zakretati letva volana. U tom izborniku se može određivati i korak promjene na ova tri navedena parametra, slika 45.





	Edit Value
Bump Travel ( see extended option )	30,000
Rebound Travel ( see extended option )	-30,000
Bump Rebound Increment ( see extended	2,500
Roll Angle (deg)	3,000
Roll Increment (deg)	0,500
Steer Travel (mm)	25,000
Steer Increment (mm)	2,500
Wheelbase (mm)	1600,000
C of G Height (mm)	320,000
Braking Front (%)	60,000
Drive Front (%)	0,000
Total Weight Front (%)	45,000
Front Brake Type (1 = Inboard 2 = Outboard )	2
Rear Brake Type (1 = Inboard 2 = Outboard )	2
Total Sprung Weight (kg)	187,0000
Front Type (1 = Independent 2 = Rigid )	1
Rear Type (1 = Independent 2 = Rigid )	1
Drive Shaft Joint (Tulip) Radius (mm)	65,0000
No of Bump Increments	12
No of Rebound Increments	12
No of Roll Increments	13
No of Steer Increments	21

OK Cancel

Slika 45. Izbornik za unos dodatnih parametara

Sljedeća stavka koju je moguće unijeti i dodatno opisati su pneumatici (engl. *view edit tyre data*), slika 46. U tom jednostavnom izborniku se može definirati njihova visina, širina te krutost.

**Tyre 1 Properties :**

Tyre
Wheel

Static Colour:

Incremental Colour:

Fill Colour:

Spring Colour:

	Front -ve Y	Front +ve Y	Rear -ve Y	Rear +ve Y
Rolling Radius (mm):	260,000	225,000	260,000	261,000
Tyre Width (mm):	158,000	178,000	158,000	178,000
Vertical Stiffness (N/mm):	184,000	400,000	184	400,000
Spring Radius (mm):	12,000			
Resolution (max 101):	20			
Diameter Shoulder (0-1):	0,900			
Width Shoulder (0-1):	0,750			

☒ Enhanced Visibility
 

Tyre: Default  
 Wheel: Default

F+veY	F-veY	R+veY	R-veY

☒ Tyre Spring Visibility

OK
Cancel
Apply

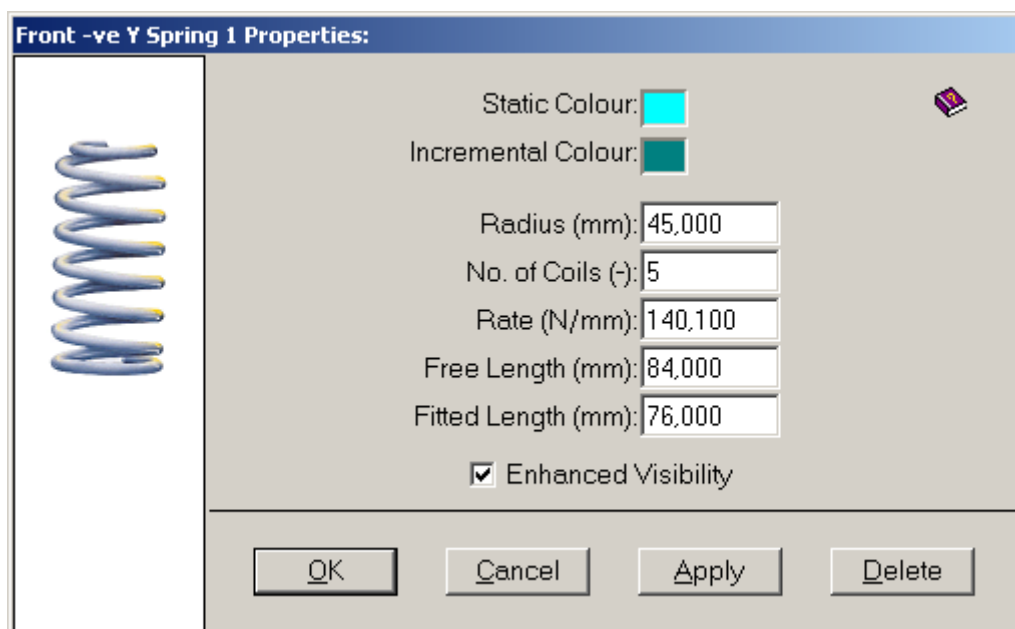
*Slika 46. Izbornik za definiranje pneumatika*

Nakon odabira vrste ovjesa i opisa unose se točke ovjesa koje pobliže opisuju geometriju ovjesa bolida (engl. *view edit front/rear coordinates*), slika 47.

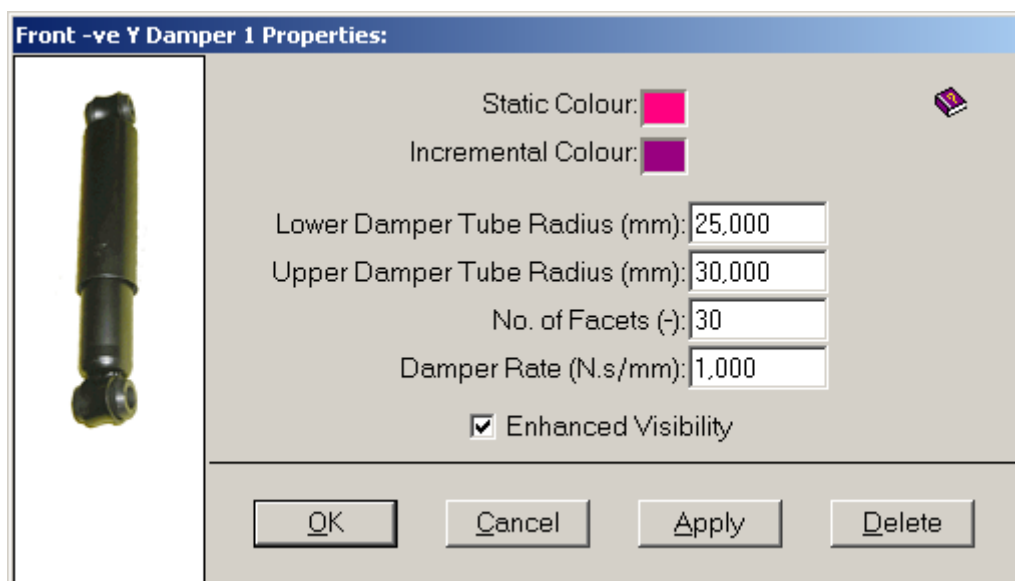
Front (-ve Y) Suspension Coords (3D)						
	Label	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Long Label	Comment
1	1	-115.0400	-246.8300	232.8300	Lower wishbone front pivot	
2	2	84.9600	-246.8300	232.8300	Lower wishbone rear pivot	
3	3	-11.0300	-620.6100	127.5000	Lower wishbone outer ball inint	
4	4	-15.0400	-246.9300	427.0500	Upper wishbone front pivot	
5	5	114.9600	-246.9800	427.6500	Upper wishbone rear pivot	
6	6	11.0300	-589.0600	395.5000	Upper wishbone outer ball inint	
7	7	-11.6600	-559.1200	163.6400	Push rod wishbone end	
8	8	20.1600	-261.3700	480.3500	Push rod rocker end	
9	9	-34.9700	-611.0600	395.5100	Outer track rod ball joint	
10	10	-45.0400	-249.9500	430.1600	Inner track rod ball joint	
11	11	20.2600	-81.0000	540.0000	Damper to body point	
12	12	20.1600	-233.4600	523.3300	Damper to rocker point	
13	13	0.0000	-596.8500	260.0000	Wheel spindle point	
14	14	0.0000	-650.0000	260.0000	Wheel centre point	
15	15	30.0000	-218.2800	455.0000	Rocker axis 1st point	
16	16	10.0000	-218.2800	455.0000	Rocker axis 2nd point	
17	17	220.0000	415.0000	185.0000	Part 1 C of G	
18	18	255.0000	-355.0000	385.0000	Part 2 C of G	
19	19	300.0000	-475.0000	390.0000	Part 3 C of G	
20	20	160.0000	-450.0000	350.0000	Part 4 C of G	
21	21	220.0000	-190.0000	475.0000	Part 5 C of G	
22	22	135.0000	-790.0000	335.0000	Part 6 C of G	

*Slika 47. Izbornik za definiranje karakterističnih točaka ovjesa*

Sljedeći parametar koji se može definirati je opruga amortizera, Slika 48. Potrebno je napomenuti da pri definiranju prigušnih elemenata u LSA se to radi pomoću konstanti, dok se u aplikaciji CarSIM to može definirati preciznije pomoću proračuna u zavisnosti o pomaku opruge. Isti slučaj je i kod definiranja amortizera, slika 49.

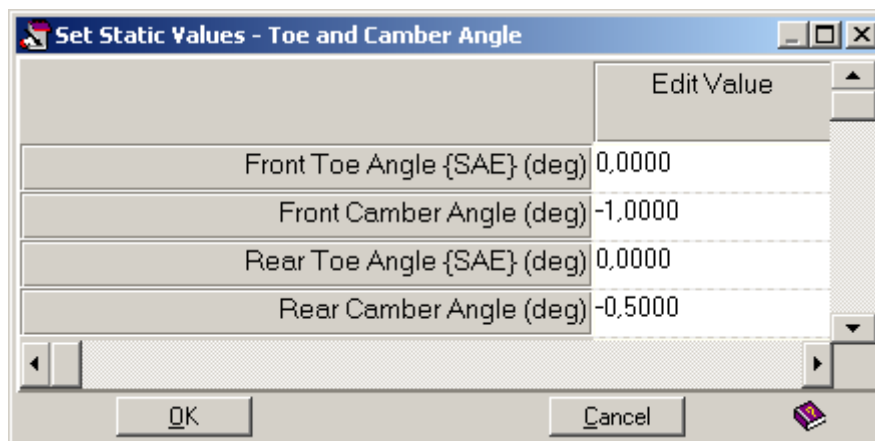


*Slika 48. Izbornik za definiranje opruge*



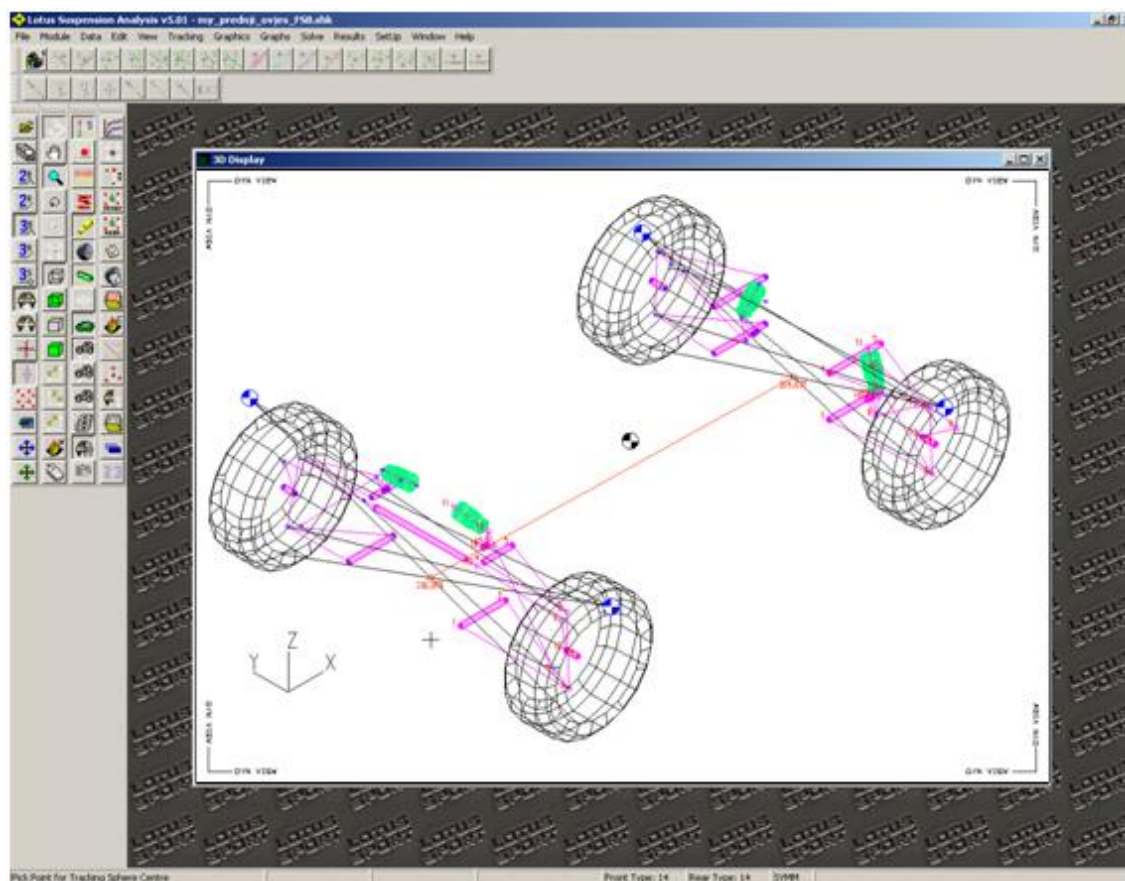
*Slika 49. Izbornik za definiranje amortizera*

Sljedeće što se može definirati su statički bočni nagib kotača (engl. *camber angle*) za prednju i stražnju osovinu, te se može definirati statička otvorenost kotača (engl. *toe angle*), slika 50.



*Slika 50. Izbornik za definiranje statičkih karakteristika kotača*

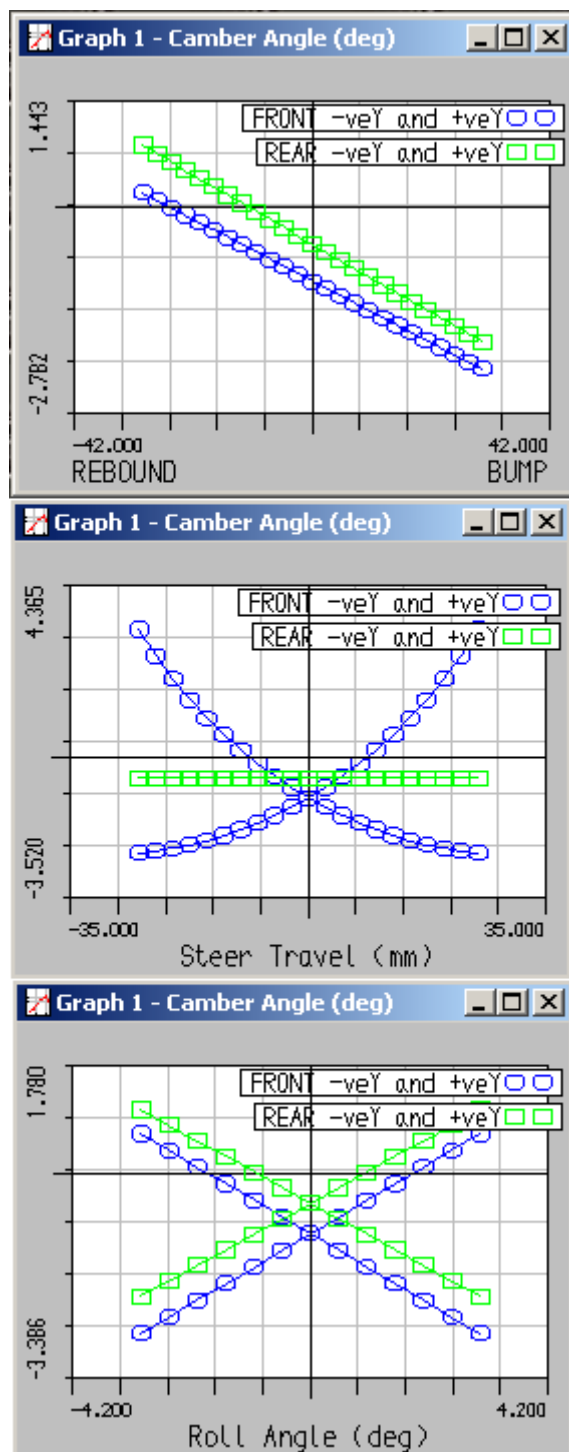
Nakon unosa svih značajki dobije se u potpunosti opisan model koji se može vidjeti na slici 51. Žute točke na modelu su trenutna središta rotacije koja se spominju u poglavlju 3.1. .



*Slika 51. Model bolida u LSA*

Kada je definiran model u LSA potrebno je dodati dijagrame promatranih značajki u prozor (slika 30.) kako bi se vidjela njihova promjena uslijed zadanog opterećenja, a kao što je već rečeno postoje tri slučaja za koje se promatra promjena, hod kotača gore-dolje, zakretanje prednjih kotača lijevo-desno te njihanje cijelog bolida lijevo-desno.

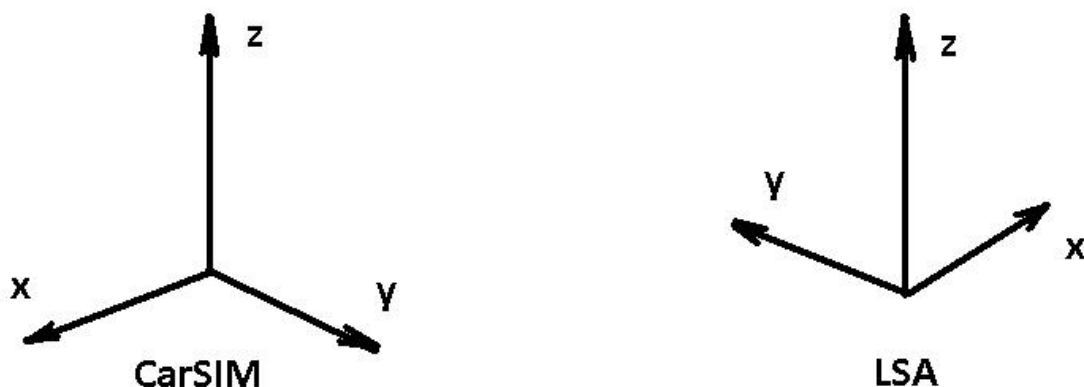
Na slici 52. se prikazuje promjena samo jedne značajke, promjena bočnog nagiba kotača za sva tri slučaja.



Slika 52. Dijagrami promjene bočnog nagiba kotača

Kako bi se dobivene vrijednosti mogle prebaciti i koristiti u aplikaciji CarSIM potrebno je vrijednosti prebaciti u Excel tablicu. Potrebno je napomenuti da pri prijenosu podataka iz jedne aplikacije u drugu treba uzeti u obzir postavljeni koordinatni sustav, slika 53.

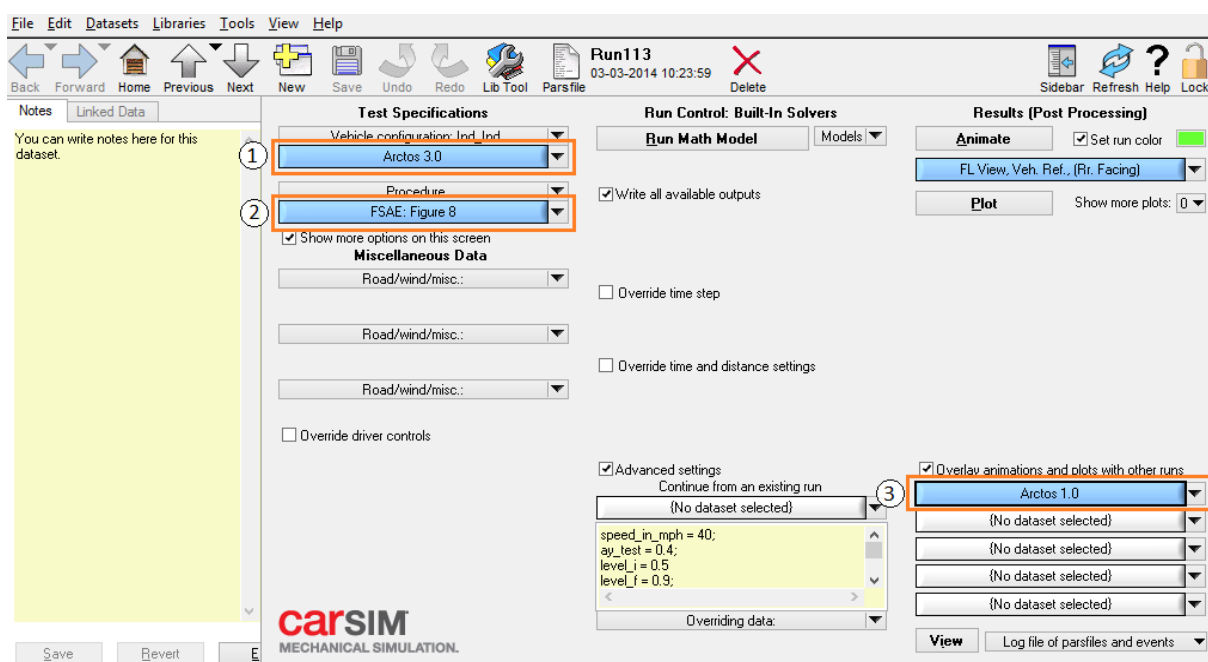




Slika 53. Različita definicija koordinatnih sustava u programskim paketima

### 5.3. Izrada modela u aplikaciji CarSIM

Glavno sučelje programa CarSIM prikazano je na slici 54. Osnovne značajke glavnog sučelja su označeni prema brojevima na slici 54. i označavaju tri osnovne funkcije CarSIM-a, a to su definiranje modela vozila (1), odabir ispitne procedure (2) i usporedba dvaju ili više modela na istom dijagramu (3).

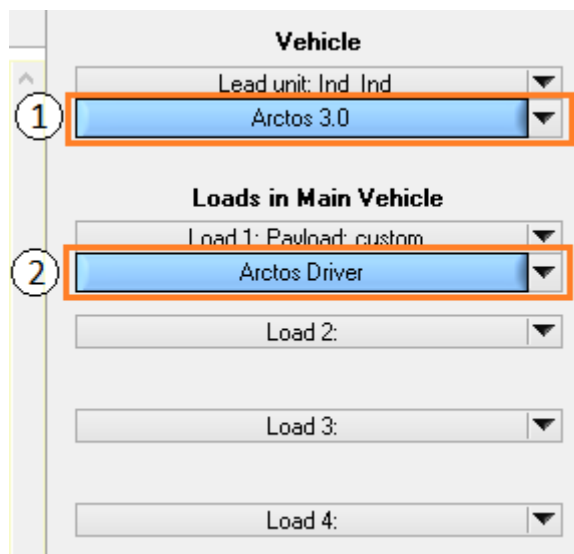


Slika 54. Glavno sučelje programa CarSim

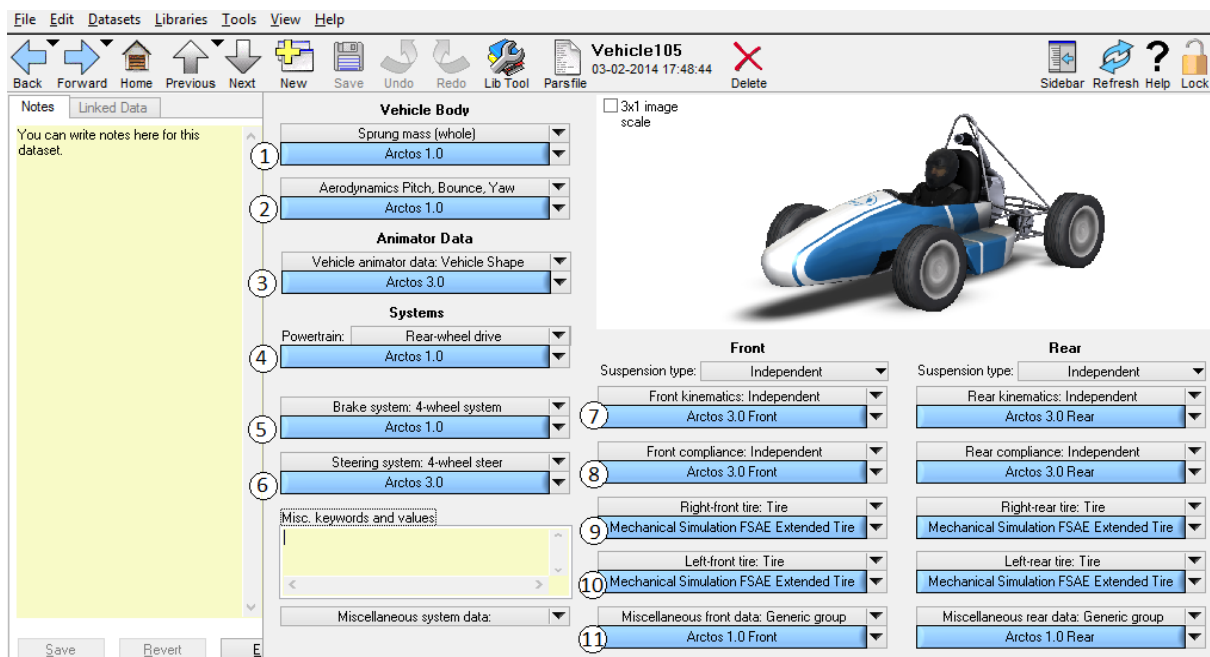
Za što točnije simuliranje vožnje formule potrebno je uvrstiti karakteristiku vozača. Za definiranje vozača potrebno je odabrati iz padajućeg izbornika *Vehicle configuration - Loaded condition*. Na slici 55. definiranje vozila vrši odabirom na prozor ① dok je zadavanje dodatnih opterećenja kao što je masa vozača potrebno zadati preko prozora ②. Moguće je također definirati dodatna opterećenja vozila kao što je položaj



rezervoara goriva kao i njegova masa, što u ovo slučaju neće biti definirano jer je masa rezervoara sa gorivom uzeta u obzir prilikom mjerenja težišta.



Slika 55. Prozor za definiranje korištenog modela



Slika 56. Prozor definiranja postavki vozila

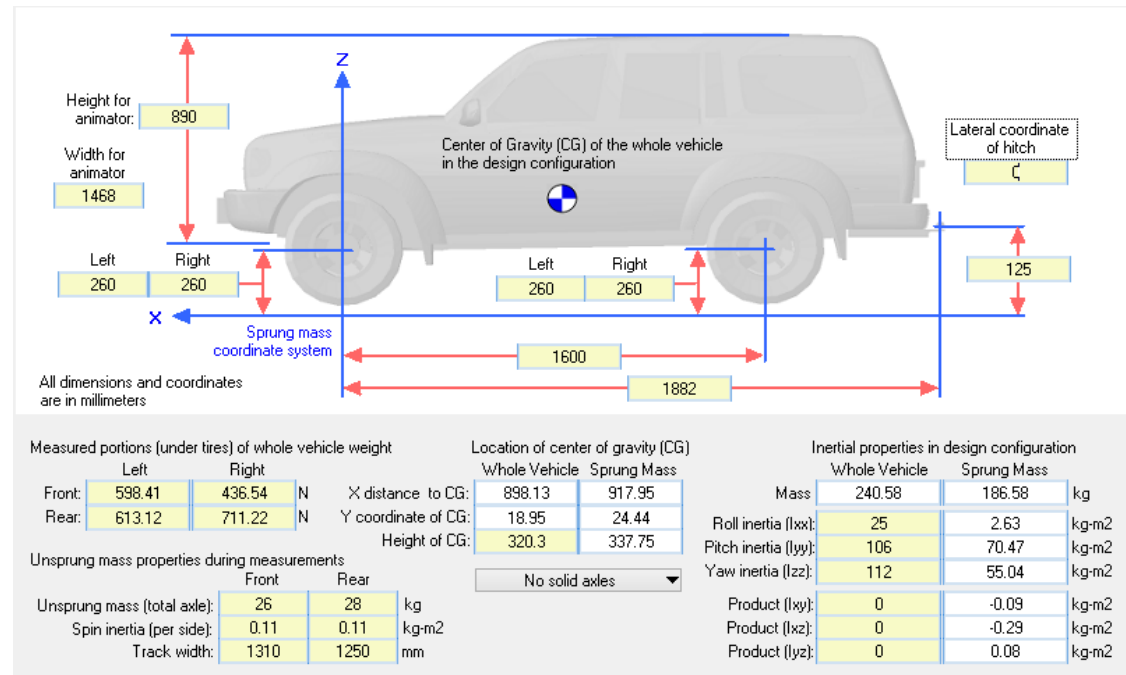
### 5.3.1. Vozilo (engl. *Vehicle body*)

Ulaskom u prozor naziva Arctos 3.0 sa Slika 55 55. (broj polja 1) otvara se sučelje za definiranje vozila prikazano na slici 54. Sučelje za definiranje vozila podijeljeno je u područja za definiranje mase vozila i položaja centra gravitacije (engl. *Vehicle Body* ① i ②), definiranje izgleda modela u animaciji (engl. *Animator Data* ③) i kompletan sustav kotača koji se sastoji od pogona (engl. *Powertrain* ④), sustava kočenja (engl. *Brake system* ⑤), sustav upravljanja (engl. *Steering system* ⑥) te kompletna kinematska

svojstva prednjeg i stražnjeg ovjesa kao i svojstva korištenih guma (⑦, ⑧, ⑨, ⑩). Polje pod rednim brojem jedan (①) u kojem se određuje masa vozila potrebno je namjestiti u programu CarSIM tako da uzima u obzir ukupnu masu što se uključuje padajućim izbornikom pod ① (engl. *Sprung mass (whole)*). Postupak određivanja ukupne mase kao i opterećenja prednje i stražnje osovine, a time i položaja centra gravitacije napravljen je mjerenjem na vagama, postupak je prikazan na slici 57.



Slika 57. Vaganje bolida FSB Arctos u svrhu određivanja visine težišta te udaljenosti od prednje osovine

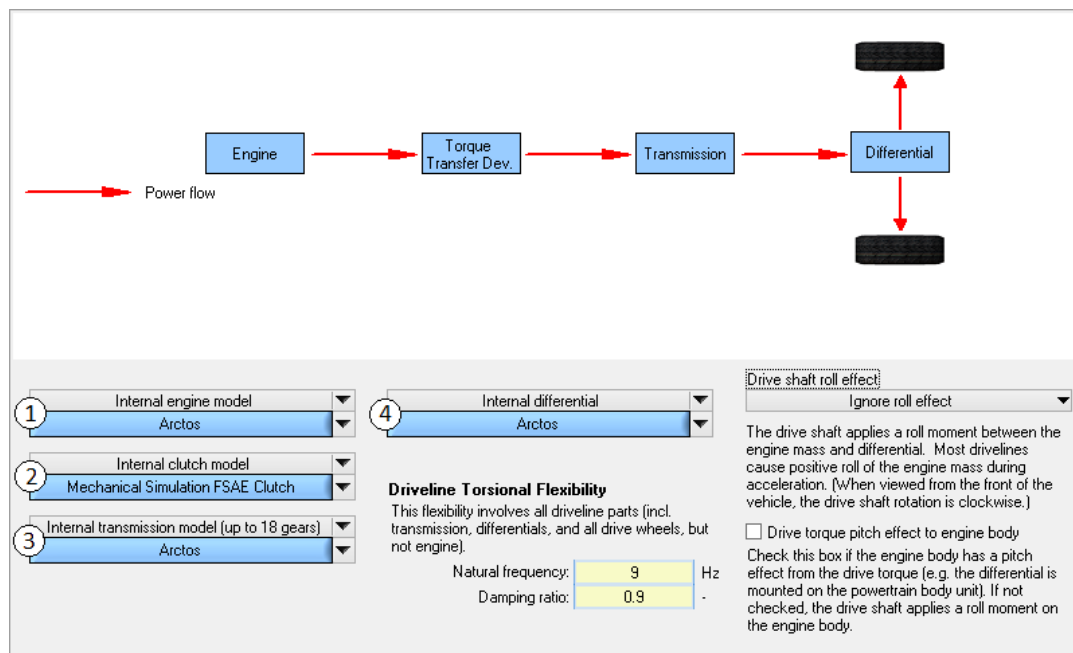


Slika 58. Prikaz sučelja za definiranje mase i centra gravitacije vozila kao i pripadajućih momenata inercije oko odgovarajućih osi

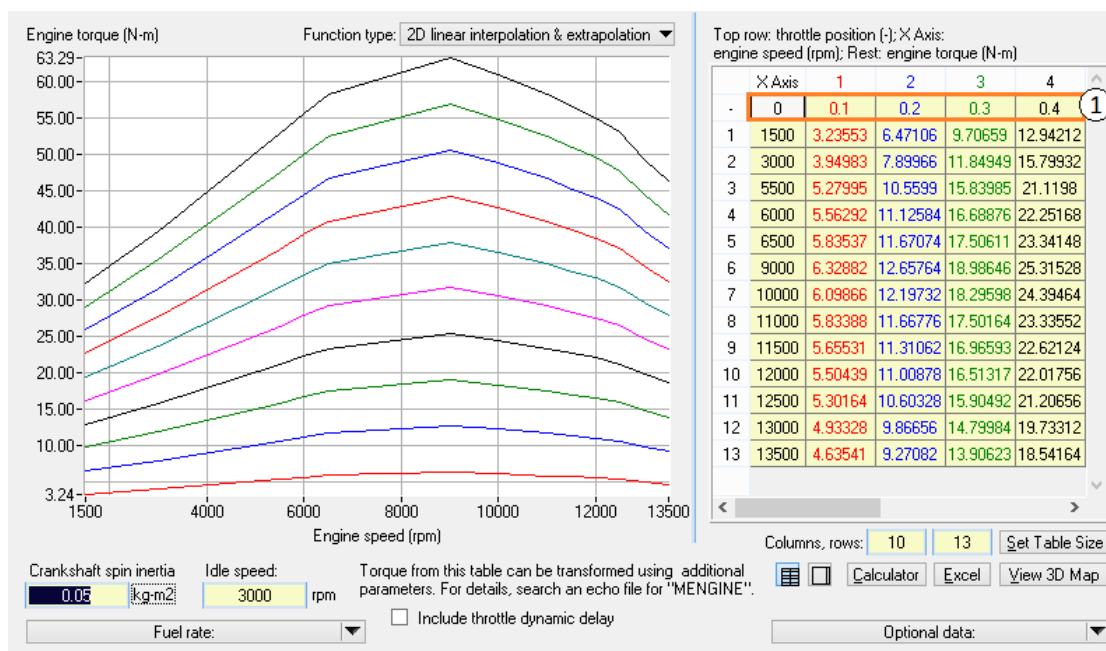
Uvrštavanjem dobivenih vrijednosti vaganjem (ovješanih i ne ovješanih masa) i mjerenjem vozila moguće je u potpunosti definirati vozilo kako je prikazano na slici 58. U prilogu se nalazi proračun težišta na temelju obavljenih mjerenja u aplikaciji Matlab/MathCAD koji se poklapaju sa dobivenim vrijednostima u CarSIM-u.

### 5.3.2. Motor i prijenos snage (engl. System)

Definiranje karakteristike motora, spojke, mjenjačke kutije te diferencijala vrši se otvaranjem sučelja broj četiri (④) sa slike 54. koji je prikazan na slici 59.



Slika 59. Prikaz sučelja za definiranje prijenosa snage modela



Slika 60. Mapa motora

Definiranje karakteristike momenta motora prikazano je na slici 60. definiran tablicom u kojem je prvi stupac apscisa, brzina vrtnje motora, a svaki sljedeći definira krivulju momenta za otvorenost zaklopke u postotcima koja se definira u prvom redu svakog stupca ①. Prijenosni omjer mjenjačke kutije definira se otvaranjem sučelja broj tri (③) sa slike 59. za svaku brzinu prikazan je na slici 61.

Up to 18 gears | Internal shift schedule

6 Forward gears

	Gear Ratio	Inertia	Driving Efficiencies	Coasting
R:		0.01	1	1
N:		0.015		
1:	2.75	0.015	0.95	0.99
2:	2	0.015	0.95	0.99
3:	1.667	0.015	0.95	0.99
4:	1.444	0.015	0.95	0.99
5:	1.304	0.015	0.95	0.99
6:	1.208	0.015	0.95	0.99

Shift duration: 0.075 sec

**Shift Schedules**

1-2:	Shift 1st to 2nd
2-3:	Shift 2nd to 3rd
3-4:	Shift 3rd to 4th
4-5:	Shift 4th to 5th
5-6:	Shift 5th to 6th

Slika 61. Prikaz prijenosnih omjera mjenjača

### 5.3.3. Upravljanje (engl. *Steering*)

**Steering Column Properties**

Column inertia: 0.05 kg-m2  
 System inertia: 0.000101 kg-m2  
 Column damping: 0 Nm-s/deg  
 Column hysteresis: 0 Nm  
 Hysteresis ref. angle: 0 deg  
 Calculate torque from kingpin moments

**Kingpin Geometry**

	Left-Front	Right-Front	Left-Rear	Right-Rear
Lateral offset @ center:	-40.77	-40.77	-35.73	-35.73
Kingpin inclination:	8.46	8.46	6.2	6.2
X coord. of KP @ center:	27.46	27.461	-0.63	-0.63
Caster angle:	8.6	8.6	-1.207	-1.207

**Front Steering System Type**  
 Front: manual rack and pinion

**Rear Steering System Type**  
 Rear: no rear steering

**Steering Gear Kinematics**  
 Constant rack & pinion ratio  
 C factor: 100 mm/rev

**Road-Wheel Steer vs. Steering Gear**  
 Rack to front wheels: Steer kinematics  
 Arcos 3.0

**Compliance**  
 Front compliance: Steering compliance  
 No Steer Compliance  
 Rear compliance: Steering compliance  
 No Steer Compliance

**Speed-Sensitive Ground-Friction Steer Torque**  
 Front wheels: Parking Torque  
 Zero

Front steering damping: 30 N-s/mm

**Front View** **Side View**

Kingpin inclination angle  
 Kingpin lateral offset  
 Caster angle  
 Steering axis

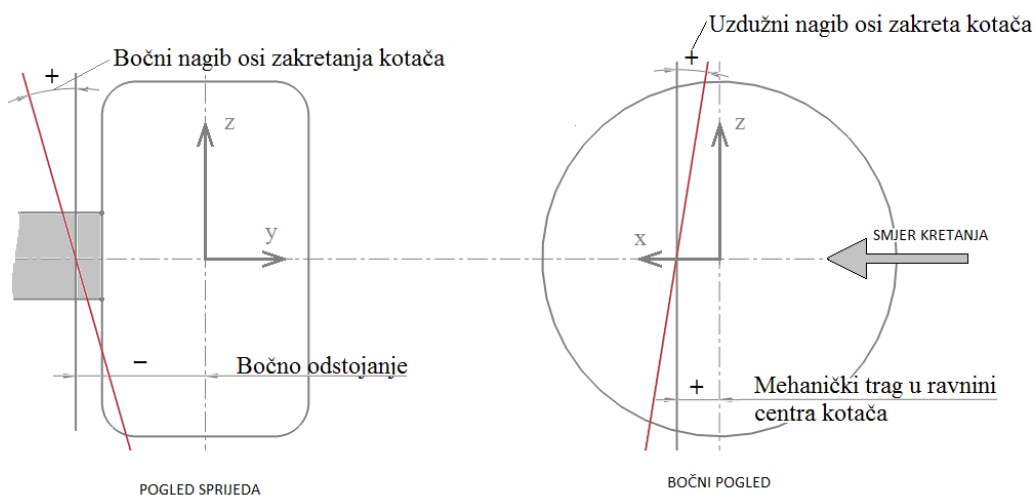
Slika 62. Karakteristike upravljanja na prednjoj osovin

Definiranje upravljanja vrši se otvaranjem sučelja broj šest (⑥) sa slike 54. Tablica statičkih karakteristika ovjesa prikazana je u tablici 6.

Tablica 6. Statičke karakteristike geometrijskih značajki

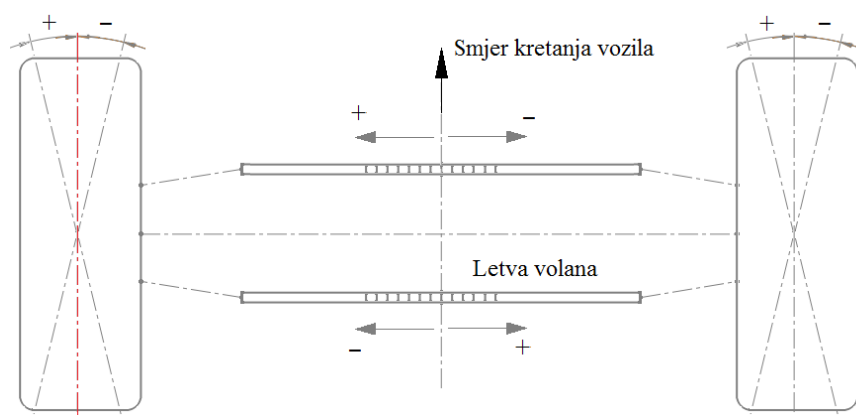
	Lijevi-prednji	Desni-prednji	
Bočno odstojanje osi zakreta kotača od centra kotača	-44.77	-44.77	mm
Bočni nagib osi zakreta kotača	8.46	8.46	deg
Mehanički trag u ravnini centra kotača	27.46	27.46	mm
Uzdužni nagib osi zakreta kotača	8.6	8.6	deg
	Lijevi-stražnji	Desni-stražnji	
Bočno odstojanje osi zakreta kotača od centra kotača	-35.73	-35.73	mm
Bočni nagib osi zakreta kotača	6.2	6.2	deg
Mehanički trag u ravnini centra kotača	-0.63	-0.63	mm
Uzdužni nagib osi zakreta kotača	-1.207	-1.207	deg

Prikazane vrijednosti potrebno je uvrstiti sa odgovarajućim predznakom koji odgovara konvenciji sa slike Slika 63.



Slika 63. Prikaz koordinatnog sustava kotača i položaja značajki

Za potpuno definiranje upravljanja kotača potrebno je definirati zakret kotača u ovisnosti o pomaku letve volana. Definiranje navedene karakteristike vrši se otvaranjem sučelja pod brojem jedan(①) prikazanog na slici Slika 62. Pravilno definiranje predznaka zakreta kotača kao i smjera pomaka letve volana prikazano je na slici 64. Zakretanje kotača definira se u odnosu na koordinatni sustav vozila te se definira postavljanjem sučelja pod rednim brojem dva (②) sa slike Slika 62. postavljanjem na engl. *Define steer angles in vehicle coordinates*.



Slika 64. Prikaz predznaka pomaka kotača u ovisnosti i položaju letve upravljača

Ovisnost stupnja zakreta kotača o pomaku letve volana prikazana je na slici 64. te je potrebno voditi računa o položaju letve volana, ispred ili iza osi zakretanja kotača.

### 5.3.4. Kinematika kotača

Kinematika kotača definira promjenu kutova kotača u ovisnosti o hodu kotača. Potrebno je odabrati vrstu ovjesa koju definiramo, u ovom slučaju to je neovisni ovjes (engl. *Independent*). Otvaranjem sučelja a slike Slika 56. pod rednim brojem sedam (7) otvara se prozor prikazan na slici Slika 65.

**Mass and Inertia**

Unsprung mass (both sides): 26 kg

Fraction steered (0-1): 0.9

Spin inertia for each side:

Left	Right	kg-m2
0.11	0.11	

Wheel centers: 1310 mm

Dimensions are in millimeters

Spring mass origin

☐ Set wheel center height here

Lateral coordinate of suspension center: 0 mm

Note: No roll center location is specified because the location and movement of the axle are defined by the kinematic data.

**Static Alignment Settings**

	Left	Right	deg
Camber:	0	0	
Toe:	0	0	

**Kinematics Based on Jounce**

Define jounce from spring data

**Wheel Dive Movement Due to Jounce**

Left wheel dive (caster change): Dive table	Right wheel dive (caster change): Dive table
Arctos 3.0 Front	Arctos 3.0 Front

**Wheel Roll Movement Due to Jounce**

Left wheel camber: Camber	Right wheel camber: Camber
Arctos 3.0 Front	Arctos 3.0 Front

**Toe (Steer) Due to Jounce**

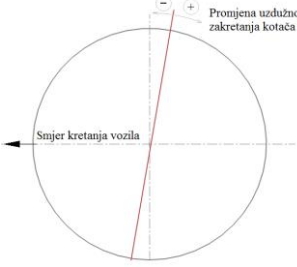

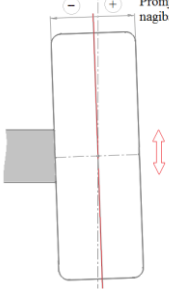

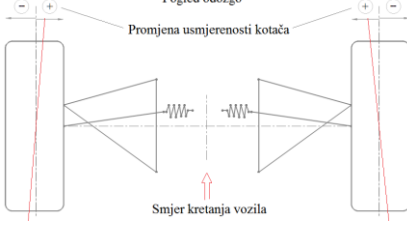
Left wheel toe: Toe	Right wheel toe: Toe
Arctos 3.0 Front	Arctos 3.0 Front

Front End View + Camber

Top View + Toe

Slika 65. Kinematika kotača

Iznosi tabličnog zapisa promjene pojedine komponente ovjesa definirani su u prilogu ovog rada. Unos podataka u tablici mora ići od manjeg prema većem broju (ukoliko broj ima negativan predznak unosi se prvi). Definiranje pojedinih promjena potrebno je izvesti poštivanjem predznaka prema kojem se ta promjena odvija. Ukoliko odgovarajuća promjena ima određenu vrijednost u nultom položaju potrebno je promjenu prilagoditi tako da je vrijednost te iste jednaka nuli. Primjeri predznaka dani su prikazom na slici 66.

 <p>Promjena uzdužnog nagiba osi zakretanja kotača</p> <p>Smjer kretanja vozila</p>	<p>-promjena uzdužnog nagiba osi zakretanja kotača-vertikalnim hodom prema gore se smanjuje dok hodom prema dolje se povećava</p>
 <p>Promjena međuosovinskog razmaka</p> <p>Smjer kretanja vozila</p>	<p>-promjena međuosovinskog razmaka- vertikalnim hodom prema gore se povećava dok hodom prema dolje se smanjuje</p>
 <p>Promjena bočnog nagiba kotača</p>	<p>-promjena bočnog nagiba kotača- vertikalnim hodom prema gore postaje negativan,dok hodom prema dolje postaje pozitivan</p>
 <p>Bočni pomak kotača</p>	<p>-promjena bočnog pomaka kotača- vertikalnim hodom prema gore se povećava,dok hodom prema dolje smanjuje</p>
 <p>Pogled odozgo</p> <p>Promjena usmjerenosti kotača</p> <p>Smjer kretanja vozila</p>	<p>-promjena usmjerenosti kotača kotača- vertikalnim hodom prema gore se povećava,dok hodom prema dolje smanjuje</p>

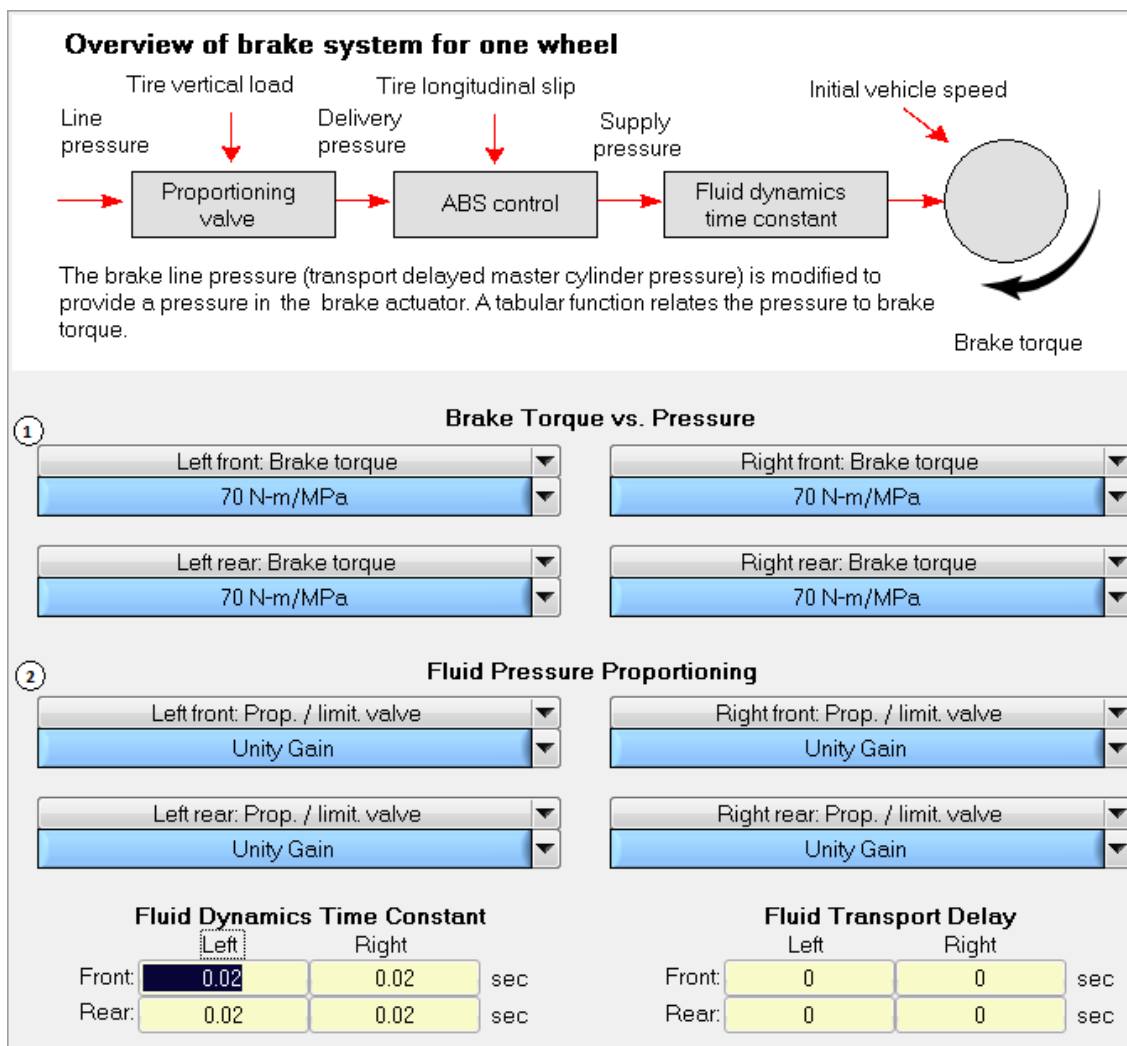
Slika 66. Prikaz smjera i predznaka djelovanja promjene parametara

### 5.3.5. Kočnice (engl. *Brake system(4 wheel system)*)

Izbornik za kočnice se nalazi pod brojem ⑤ na slici 54. U tom izborniku se unosi određuje karakteristika kočenja. Kočenje se definira iznosom koji je omjer kočnog



momenta i tlaka u kočnom sustavu te je proračunat u skladu sa veličinom kotača i pretpostavljenom težinom kojom će biti opterećen bolid.



Slika 67. Izbornik kočionog sustava

Pod točkom jedan(①) se određuje iznos kočione sile, odnosno omjer kočionog momenta i tlaka u kočionom sustavu na svaki kotač posebno.

### 5.3.6. Pneumatici

Odabirom izbornika pod točkama osam i devet(⑧, ⑨) na slici 54. otvara se izbornik u kojem se definiraju karakteristike pneumatika. Kao što se vidi na slici 68., karakteristike su označene brojkama od jedan do osam(①; ⑧). Karakteristika pod točkom jedan (①) prikazuje promjenu polumjera pneumatika uslijed opterećenja, slika 69. [6]. Od proizvođača je dobivena karakteristika za različite tlakove u pneumaticima, te karakteristika prema kojoj se promjena polumjera pneumatika mijenja i uslijed različitih statičkih bočnih nagiba kotača (engl. *camber*).



**1 Vertical Force** ☒ Use tire force table

Vertical force: Tire: Fz vs Deflection  
Avon 1.172bar

Tire Model Option  
Internal Table Model with Camber Details

**Rolling Resistance Moment**

Rr\_c: 0.004 -  
Rr\_v: 0.000025 h/km  
☒ Include rolling resistance due to Fx

**2 Shear Forces and Moments**

Longitudinal force: Tire: Fx  
Mechanical Simulation FSAE Ext. Tire - Fx

Lateral force: Tire: Fy  
Mechanical Simulation FSAE Ext. Tire - Fy

Aligning moment: Tire: Mz  
Mechanical Simulation FSAE Ext. Tire - Mz

Overturning moment: Tire: Mx  
Zero

☐ Include combined slip transition

**Animator Settings**

Tire width: 158 mm  
The unloaded radius is also used to scale the animated wheel.

☒ Use custom animator shape

Animator: Shape Group  
FSAE Tire Shape

Animator: Sound Set  
Tire Sounds - 400 kg Rated Load

**Dynamic Properties**

Tire and wheel spin moment of inertia (added to the spin inertia of the unsprung mass):  
0 kg-m<sup>2</sup>

**Tire Lag**

Tire force or moment

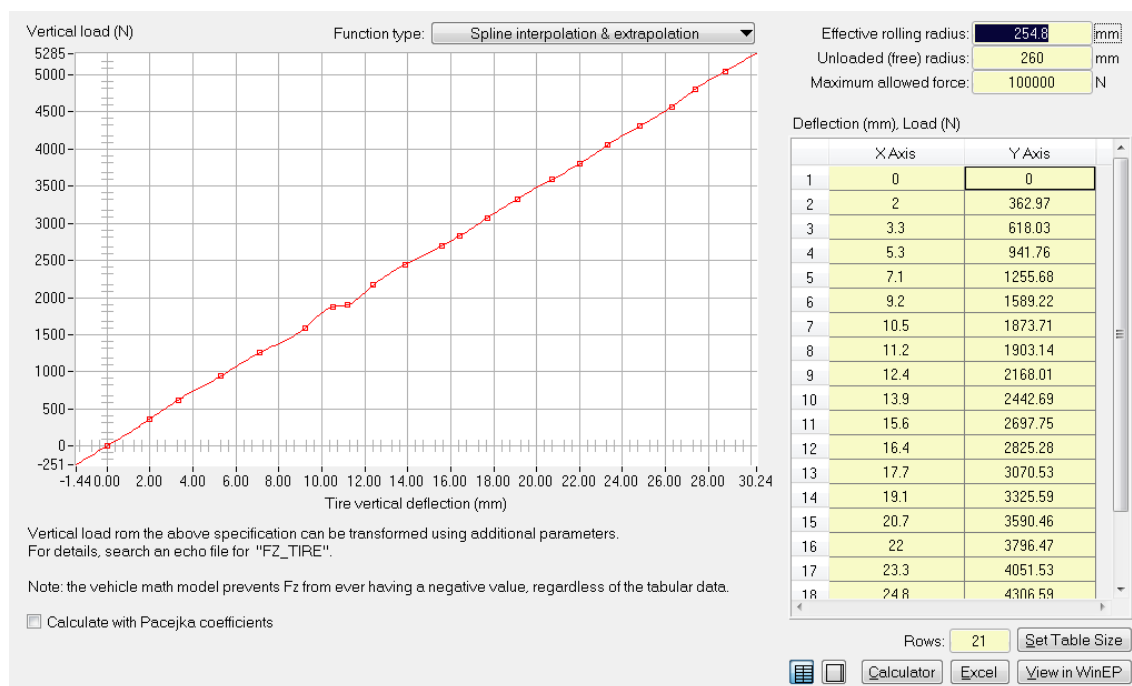
Distance rolled

5%

L for Fx: 32 mm  
L for Fy and Mz: 575 mm

The models use modified equations to simulate tire lag for Fy and Mz at speeds below this threshold.  
Cut-off speed: 5 km/h

Slika 68. Izbornik za definiranje pneumatika



Slika 69. Izbornik za definiranje promjene polumjera kotača uslijed opterećenja

Ostale karakteristike sa slike 68., od točke dva do osam, su u korelaciji sa više faktora; opisuju djelovanje horizontalnih sila, bočnih sila u zavisnosti o promjeni bočnog nagiba kotača (engl. *camber*), kuta klizanja (engl. *slip angle*) i omjera kuta klizanja i faktora trenja (engl. *slip ratio*). Djelovanjem tih sila, javljaju se i momenti koji djeluju na pneumatike koji su isto tako u zavisni o promjeni spomenutih faktora ako i sile.

## 6. Usporedba modela formule sa različitim geometrijskim značajkama ovjesa

U ovome poglavlju će se prikazati izrađeni modeli prema navedenom načinu u prijašnjim poglavljima koristeći aplikaciju Lotus Suspension Analysis. Koriste se dva modela pod imenima Arctos 1.0 i Arctos 3.0. Model Arctos 1.0 predstavlja model koji je stvarno napravljen i koji je prema navedenom zadatku bilo potrebno što točnije opisati i analizirati, dok model Arctos 3.0 predstavlja opisani bolid koji se napravljen prema uputama i prijedlozima iz navedene literature.

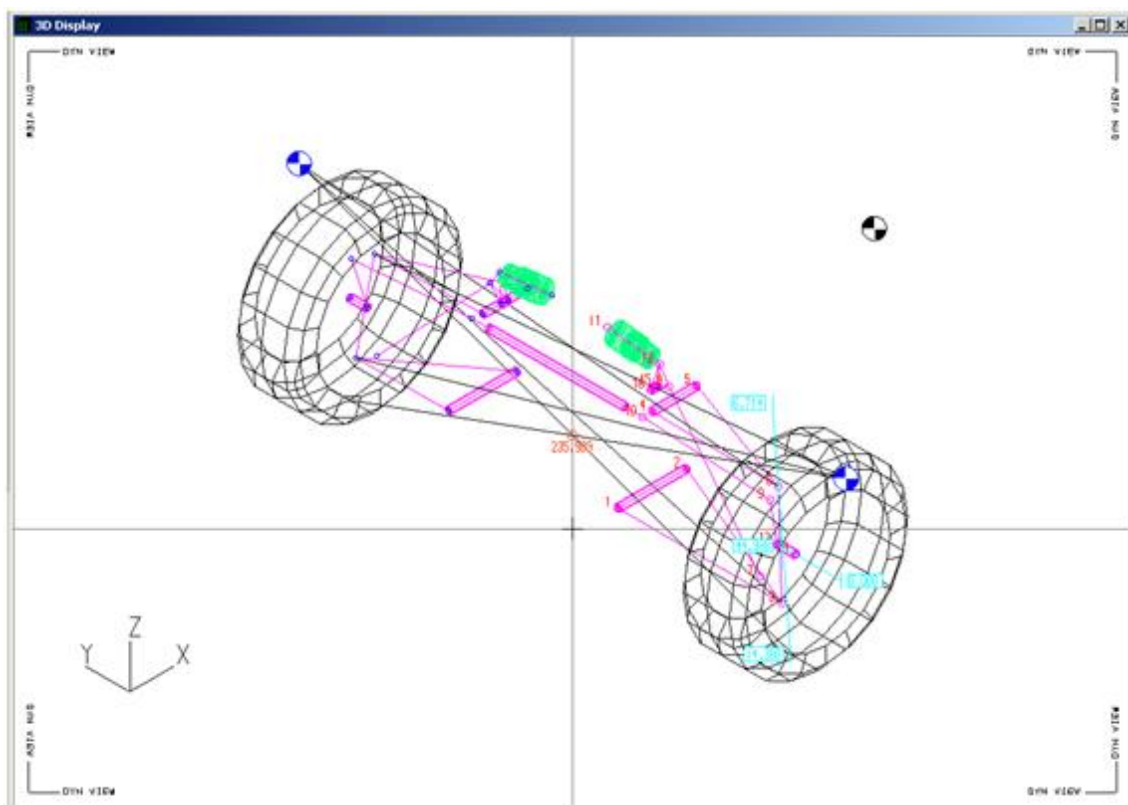
### 6.1. Model Arctos 1.0

Kako bi se uopće mogao opisati model u aplikaciji CarSIM, potrebno je bilo prvo napraviti model u LSA koristeći karakteristične točke prihvata ovjesa. U tablici 7. su navedene koordinate karakterističnih točaka prednjeg ovjesa.

Tablica 7. Karakteristične točke prihvata prednjeg ovjesa modela Arctos 1.0

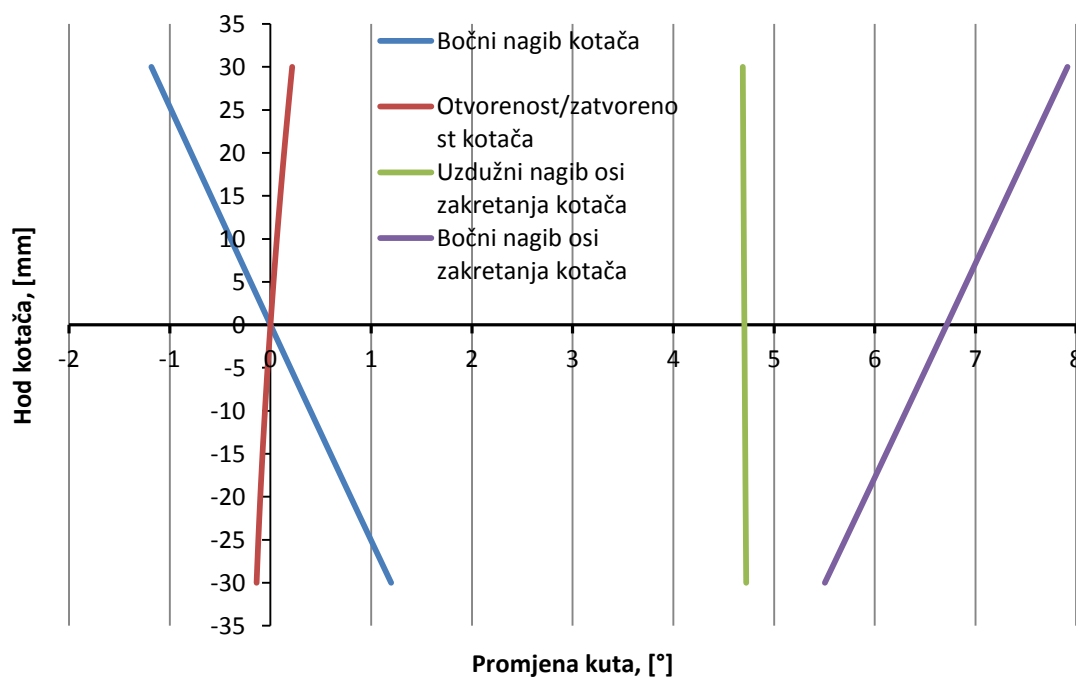
Prednji ovjes				
Točka	x(mm)	y(mm)	z(mm)	Značenje
POINT:1	-115,04	-246,83	232,83	Donje rame – prednji prihvata
POINT:2	84,96	-246,83	232,83	Donje rame – stražnji prihvata
POINT:3	-11,03	-620,61	127,5	Donje rame – prihvata rukavca
POINT:4	-15,04	-246,93	427,05	Gornje rame – prednji prihvata
POINT:5	114,96	-246,98	427,65	Gornje rame – stražnji prihvata
POINT:6	11,03	-589,06	395,5	Gornje rame – prihvata rukavca
POINT:7	-11,66	-559,12	163,64	Spona amortizera / opruga – prihvata ramena
POINT:8	20,16	-261,37	480,35	Spona amortizera / opruga – prihvata klackalice
POINT:9	-34,97	-611,06	395,51	Spona letve volana – prihvata rukavca
POINT:10	-45,04	-249,95	430,16	Spona letve volana – prihvata letve volana
POINT:11	20,26	-81	540	Amortizer/ opruga – prihvata rešetka
POINT:12	20,16	-233,46	523,33	Amortizer / opruga – prihvata klackalice
POINT:13	0	-596,85	260	Osovina kotača
POINT:14	0	-650	260	Središte kotača
POINT:15	250	-260	430	Os klackalice prva točka
POINT:16	10	-218,28	455	Os klackalice druga točka

Dobiveni model za definirane točke je prikazan na slici 70. Na toj slici su ujedno i prikazani položaji navedenih točaka iz tablice 7. Na toj slici su ujedno i prikazani iznosi nekih geometrijskih značajki, kao visina centra valjanja za prednju osovinu (engl. *body roll center*), bočni nagib kotača (engl. *camber angle*), polumjer zakretanja kotača (engl. *scrub radius*) te bočni nagib osi zakretanja kotača (engl. *kingpin inclination*).



Slika 70. Prednji ovjes modela Arctos 1.0

Promjene navedenih parametara su brojčano prikazane u tablici 8, dok je na slici 71. prikazana promjena četiri geometrijskih parametara koje imaju važnu ulogu u konstruiranju ovjesa.



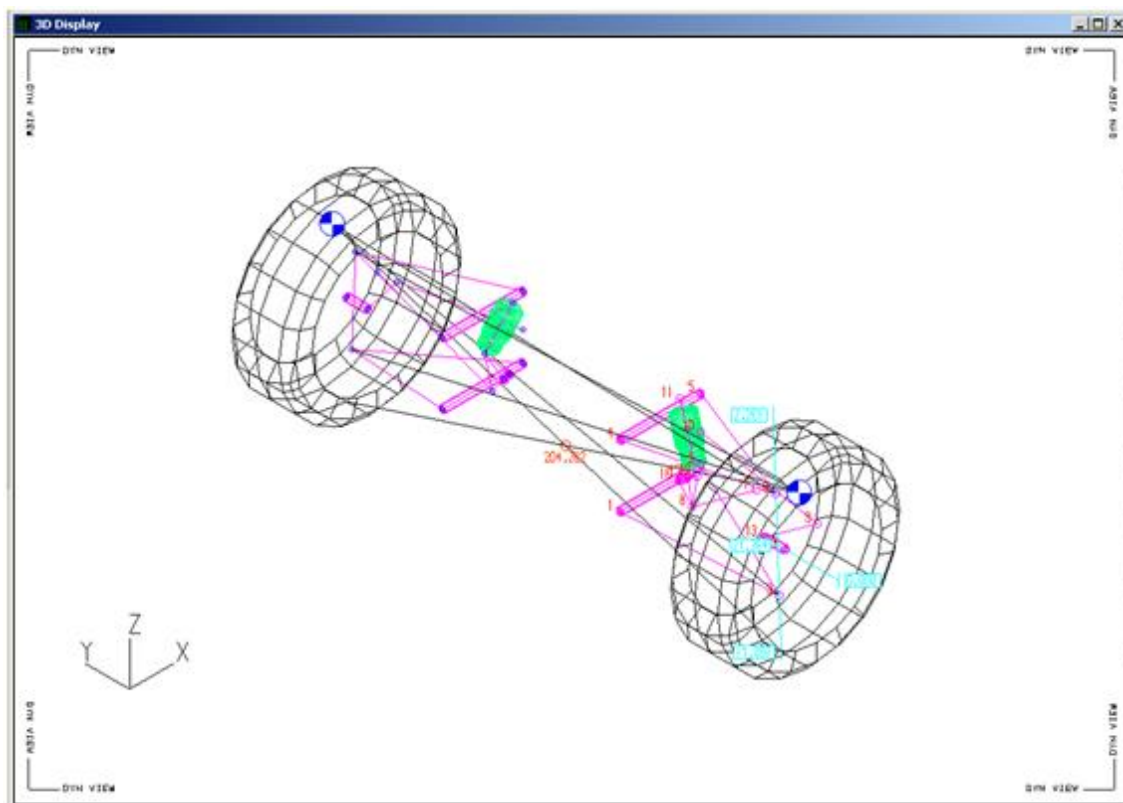
Slika 71. Promjena geometrijskih značajki prednjeg ovjesa

*Tablica 8. Promjene geometrijskih značajki prednjeg ovjesa*

Vertikalni hod kotača (mm)	Bočni nagib kotača (°)	Otvorenost/zatvorenost kotača (°)	Uzdužni nagib osi zakretanja kotača (°)	Bočni nagib osi zakretanja kotača (°)	Anti Dive-značajka (%)	Visina Središta valjanja od tla (mm)	Promjena traga kotača (mm)	Promjena međuosovinskog razmaka (mm)
-30	1.1982	-0.1377	4.7237	5.5049	-0.81	288.74	-12.21	0.03
-27.5	1.0973	-0.1293	4.7221	5.6065	-0.83	284.26	-11.09	0.03
-25	0.9966	-0.1204	4.7205	5.7079	-0.85	279.79	-9.99	0.03
-22.5	0.8961	-0.1109	4.719	5.8091	-0.88	275.34	-8.91	0.03
-20	0.7959	-0.1008	4.7174	5.9102	-0.9	270.91	-7.84	0.03
-17.5	0.6958	-0.0901	4.7159	6.0111	-0.92	266.49	-6.8	0.03
-15	0.5959	-0.0789	4.7144	6.1119	-0.94	262.09	-5.77	0.03
-12.5	0.4963	-0.0671	4.7129	6.2125	-0.96	257.71	-4.76	0.02
-10	0.3967	-0.0548	4.7114	6.313	-0.99	253.33	-3.77	0.02
-7.5	0.2973	-0.0419	4.7099	6.4134	-1.01	248.98	-2.8	0.02
-5	0.1981	-0.0285	4.7085	6.5138	-1.03	244.63	-1.85	0.01
-2.5	0.099	-0.0145	4.707	6.614	-1.06	240.3	-0.92	0.01
0	0	0	4.7056	6.7142	-1.08	235.99	0	0
2.5	-0.0989	0.0151	4.7042	6.8143	-1.11	231.69	0.9	-0.01
5	-0.1977	0.0306	4.7028	6.9143	-1.13	227.39	1.78	-0.01
7.5	-0.2964	0.0468	4.7014	7.0143	-1.15	223.12	2.64	-0.02
10	-0.395	0.0634	4.7001	7.1143	-1.18	218.85	3.49	-0.03
12.5	-0.4935	0.0806	4.6987	7.2142	-1.2	214.59	4.32	-0.04
15	-0.592	0.0984	4.6974	7.3141	-1.23	210.35	5.13	-0.05
17.5	-0.6905	0.1166	4.6961	7.4141	-1.26	206.12	5.92	-0.06
20	-0.7889	0.1354	4.6948	7.514	-1.28	201.89	6.7	-0.07
22.5	-0.8872	0.1547	4.6935	7.6139	-1.31	197.68	7.46	-0.08
25	-0.9856	0.1746	4.6922	7.7139	-1.34	193.48	8.2	-0.1
27.5	-1.0839	0.1949	4.691	7.8138	-1.36	189.29	8.93	-0.11
30	-1.1823	0.2158	4.6897	7.9139	-1.39	185.1	9.64	-0.12

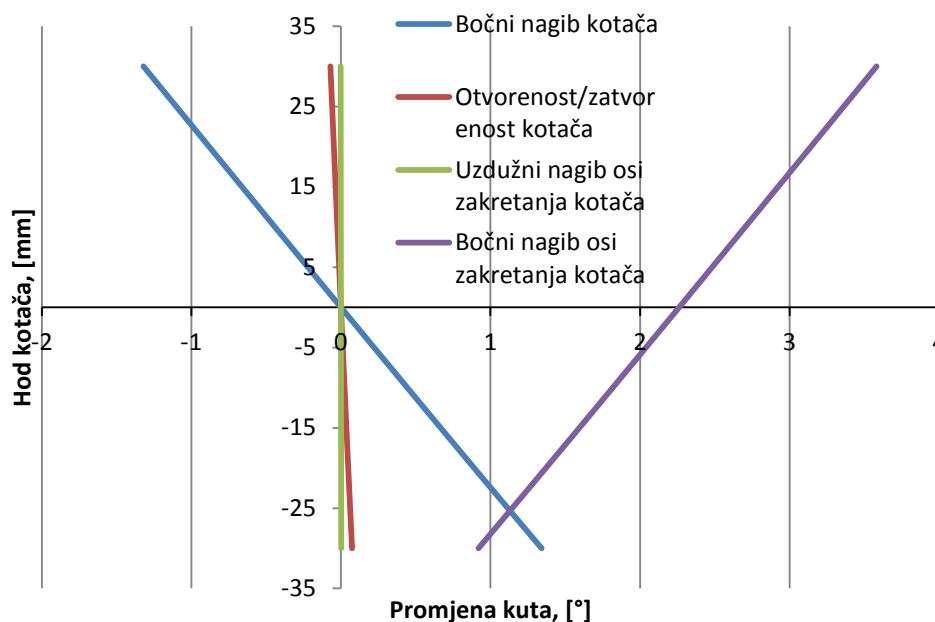
Tablica 9. Karakteristične točke prihvata stražnjeg ovjesa Arctos 1.0

Stražnji ovjes				
Točka	x(mm)	y(mm)	z(mm)	Značenje
POINT:1	1501	-253,85	216,9	Donje rame – prednji prihvata
POINT:2	1731,96	-253,83	216,84	Donje rame – stražnji prihvata
POINT:3	1600	-610,77	137,59	Donje rame – prihvata rukavca
POINT:4	1501	-254	395	Gornje rame – prednji prihvata
POINT:5	1731,96	-254	395	Gornje rame – stražnji prihvata
POINT:6	1600	-601	385	Gornje rame – prihvata rukavca
POINT:7	1602,75	-541,65	362,88	Spona amortizera / opruga – prihvata ramena
POINT:8	1676,3	-285,86	157,92	Spona amortizera / opruga – prihvata klackalice
POINT:9	1719,46	-601	251	Spona letve volana – prihvata rukavca
POINT:10	1731,96	-253,96	299,41	Spona letve volana – prihvata letve volana
POINT:11	1688,07	-238,7	396,35	Amortizer/ opruga – prihvata rešetka
POINT:12	1672	-304,25	244,34	Amortizer / opruga – prihvata klackalice
POINT:13	1600	-566	260	Osovina kotača
POINT:14	1600	-627,3	260	Središte kotača
POINT:15	1694,57	-254,93	207	Os klackalice prva točka
POINT:16	1672,43	-249,51	207,19	Os klackalice druga točka



Slika 72. Stražnji ovjes modela Arctos 1.0

U tablici 9. se nalaze pozicije točaka prihvata stražnjeg ovjesa modela Arctos 1.0, a na slici 72. prikazuje konačan izgled te geometrije. Isto kao i kod prednjeg ovjesa vidljive su neke vrijednosti statičkih vrijednosti parametara geometrije ovjesa.



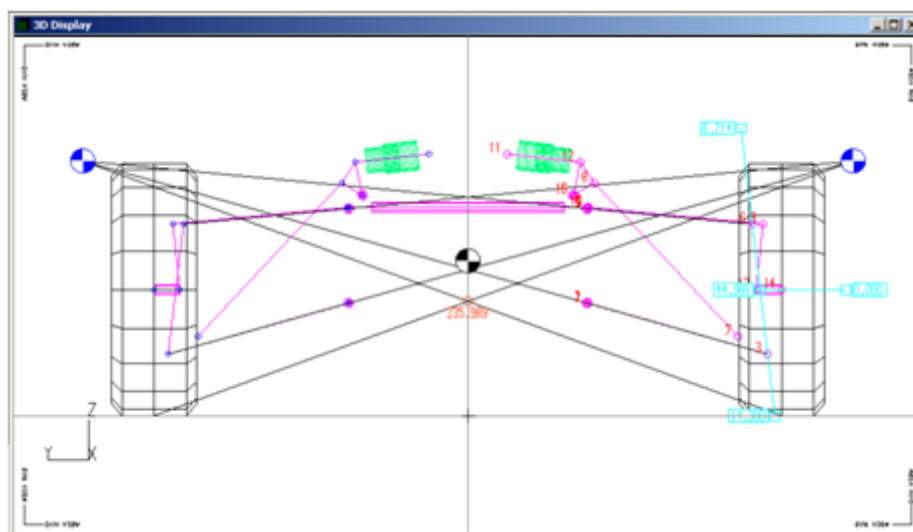
Slika 73. Promjena geometrijskih značajki stražnjeg ovjesa

Iz navedenih slika i tablica je prikazna konstrukcija i geometrija ovjesa trenutnog modela formule student Arctos 1.0. Može se uočiti da su središta valjanja postavljena vrlo visoko. U tablici 8. je navedena promjena širine traga kotača čija velika promjena je isto rezultat visoko postavljenog središta valjanja te se time omogućava da vozilo dosta ponire pri kočenju, što može rezultirati dodiranjem podnice vozila po tlu te isto tako se pogoduje tome da nema pravilnog rasporeda mase, odnosno težine na kotače prilikom prolaska kroz zavoj te dolazi do gubitka stabilnosti vozila. Pod pravilnim rasporedom mase vozila prilikom prolaska kroz zavoj se smatra da su svi kotači opterećeni. Pravilan raspored mase znači da si oslonci, u ovom slučaju kotači pomažu, jer se masa vozila raspoređuje dijagonalno, a to znači da onaj kotač koji je više opterećen pomoću pravilnog rasporeda prenosi dijagonalno na kotač koji je manje opterećen. Znači ukoliko vozilo prolazi kroz lijevi zavoj, desna strana vozila je više opterećena, te ukoliko je velika promjena širine traga kotača, vanjski, desni kotači će više propasti i prenositi veću masu nego li bi to trebali te će se tima ugroziti stabilnost vozila. Vozilo ne posjeduje anti-značajke koje bi doprinijele tomu da se samo vozilo manje propinje ili ponire. Rezultat toga je da pri konstrukciji postojećeg modela se je izbacila promjena uzdužnog nagiba osi zakretanja kotača, što je i prikazano na slici 72. i 73., te su isto tako i prikazane brojčane vrijednosti u tablicama 8. i 10., koje su vrlo male. Upravljanje kod ovog bolida je postavljeno ispred kotača no pozicionirano je iznad središta kotača, što je napravljeno iz konstrukcijskih razloga, no zbog boljih upravljačkih svojstava, ikoliko se je odlučilo tako postaviti letvu volana potrebno je letvu upravljača postaviti ispod središta kotača, odnosno učvrstiti za donji dio šasije kao što je prikazano na slici 15. Konstrukcijska izvedba ovjesa ovog modela prikazana je slikama 74., 75., i 76. . Rezultati dobiveni simulacijom će biti naknadno objašnjeni.

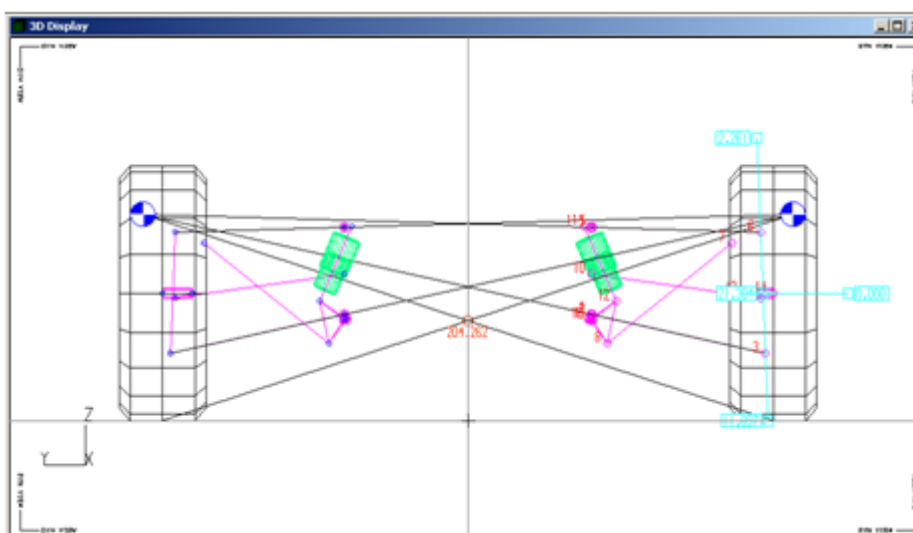
Tablica 10. Promjena geometrijskih značajki stražnjeg ovjesa

Vertikalni hod kotača (mm)	Bočni nagib kotača (°)	Otvorenost/zatvorenost kotača (°)	Uzdužni nagib osi zakretanja kotača (°)	Bočni nagib osi zakretanja kotača (°)	Anti Squat-značajka (%)	Visina Središta valjanja od tla (mm)	Promjena traga kotača (mm)	Promjena međuosovinskog razmaka (mm)
-30	13,418	0,0744	0,0019	0,9196	-0,37	257,59	-11,13	0,02
-27,5	12,286	0,068	0,0018	10,328	-0,37	253,06	-10,1	0,01
-25	11,157	0,0616	0,0016	11,457	-0,37	248,55	-9,08	0,01
-22,5	10,031	0,0553	0,0015	12,583	-0,37	244,05	-8,09	0,01
-20	0,8907	0,049	0,0013	13,707	-0,37	239,57	-7,11	0,01
-17,5	0,7787	0,0428	0,0011	14,827	-0,37	235,11	-6,16	0,01
-15	0,6668	0,0366	0,001	15,946	-0,37	230,66	-5,22	0,01
-12,5	0,5552	0,0304	0,0008	17,062	-0,37	226,22	-4,3	0,01
-10	0,4438	0,0243	0,0006	18,176	-0,37	221,8	-3,4	0,01
-7,5	0,3326	0,0181	0,0005	19,288	-0,38	217,4	-2,53	0,01
-5	0,2215	0,0121	0,0003	20,398	-0,38	213,01	-1,66	0
-2,5	0,1107	0,006	0,0002	21,507	-0,38	208,63	-0,82	0
0	0	0	0	22,614	-0,38	204,26	0	0
2,5	-0,1105	-0,006	-0,0002	23,719	-0,38	199,91	0,8	0
5	-0,221	-0,0119	-0,0003	24,823	-0,38	195,57	1,59	0
7,5	-0,3312	-0,0179	-0,0005	25,926	-0,38	191,24	2,36	-0,01
10	-0,4414	-0,0238	-0,0006	27,028	-0,38	186,92	3,11	-0,01
12,5	-0,5515	-0,0297	-0,0008	28,129	-0,38	182,62	3,84	-0,01
15	-0,6615	-0,0355	-0,001	29,229	-0,39	178,32	4,56	-0,01
17,5	-0,7714	-0,0414	-0,0011	30,328	-0,39	174,04	5,25	-0,02
20	-0,8813	-0,0472	-0,0013	31,427	-0,39	169,76	5,93	-0,02
22,5	-0,9911	-0,053	-0,0014	32,525	-0,39	165,5	6,59	-0,02
25	-11,008	-0,0587	-0,0016	33,622	-0,39	161,24	7,24	-0,02
27,5	-12,106	-0,0645	-0,0017	3,472	-0,4	157	7,86	-0,03
30	-13,203	-0,0702	-0,0019	35,817	-0,4	152,76	8,47	-0,03

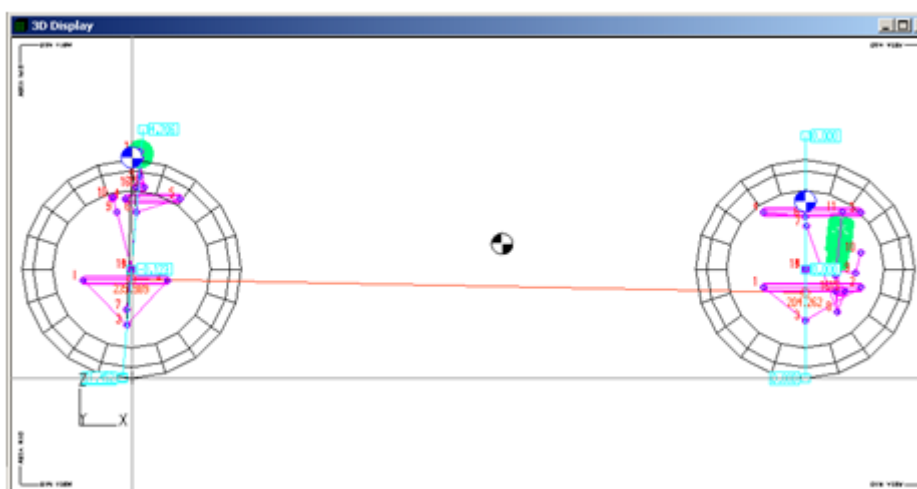




Slika 74. Prednji pogled prednjeg ovjesa modela Arctos 1.0



Slika 75. Prednji pogled stražnjeg ovjesa modela Arctos 1.0



Slika 76. Bočni pogled oba ovjesa modela Arctos 1.0

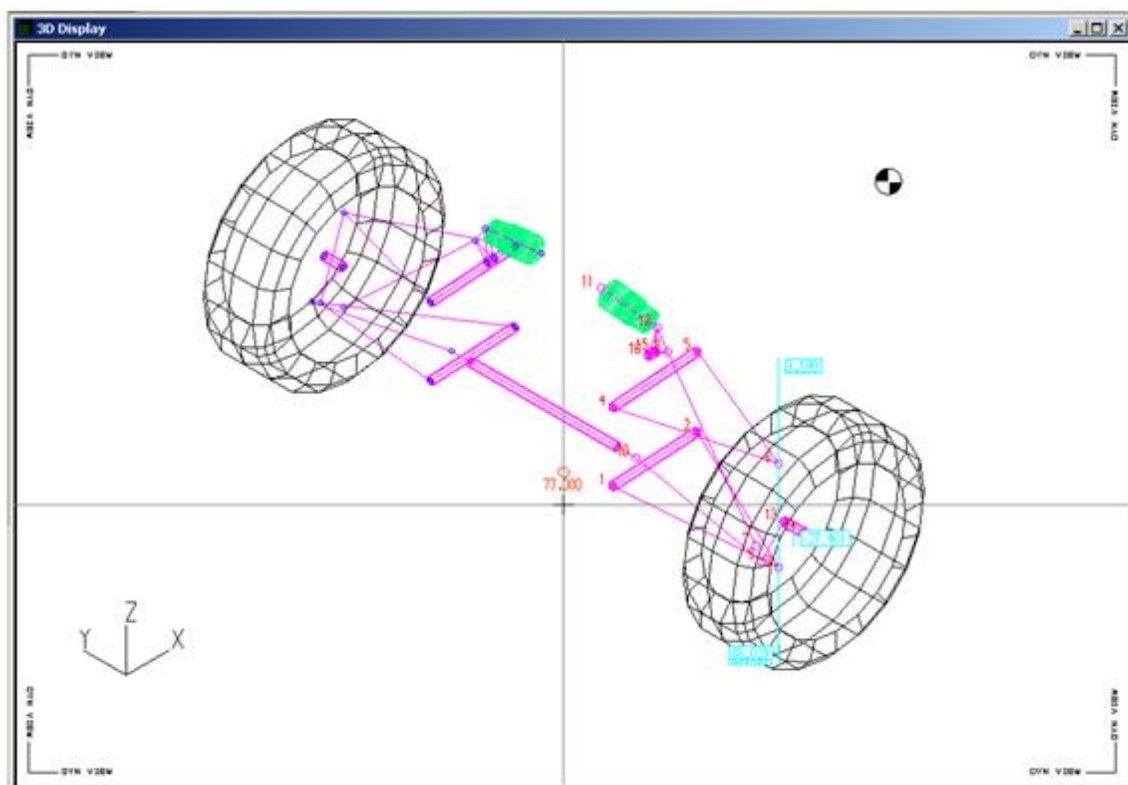
## 6.2. Model Arctos 3.0

Za ovaj model su korištene iste aplikacije kao i za model Arctos 1.0, no pri konstruiranju su korištene upute i prijedloge iz navedene literature uz određene kompromise, jer je teško dobiti sve željene karakteristike bez ikakvog kompromisa. U tablici 11. prikazane su točke prihvata za šasiju za navedeni ovjes.

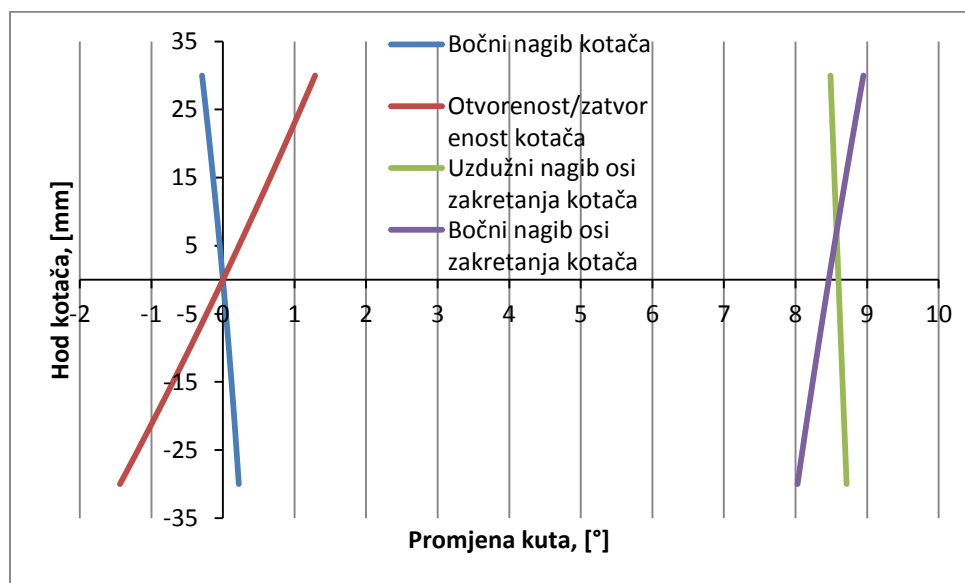
Tablica 11. Karakteristične točke prihvata prednjeg ovjesa Arctos 3.0

Prednji ovjes				
	x(mm)	y(mm)	z(mm)	Značenje
POINT:1	-115,04	-246,83	224,83	Donje rame – prednji prihvata
POINT:2	114,96	-246,83	237,83	Donje rame – stražnji prihvata
POINT:3	-39,03	-620,61	183,5	Donje rame – prihvata rukavca
POINT:4	-115,04	-246,93	410,05	Gornje rame – prednji prihvata
POINT:5	114,96	-246,98	426,65	Gornje rame – stražnji prihvata
POINT:6	-6,97	-589,06	395,5	Gornje rame – prihvata rukavca
POINT:7	-38,66	-559,12	203,64	Spona amortizera / opruga – prihvata ramena
POINT:8	20,16	-261,37	480,35	Spona amortizera / opruga – prihvata klackalice
POINT:9	-73,97	-609,06	209,51	Spona letve volana – prihvata rukavca
POINT:10	-54,04	-249,95	263,16	Spona letve volana – prihvata letve volana
POINT:11	20,26	-81	540	Amortizer/ opruga – prihvata rešetka
POINT:12	20,16	-233,46	523,33	Amortizer / opruga – prihvata klackalice
POINT:13	0	-596,85	260	Osovina kotača
POINT:14	0	-650	260	Središte kotača
POINT:15	30	-218,28	455	Os klackalice prva točka
POINT:16	10	-218,28	455	Os klackalice druga točka

Prvi kod ovog modela je bila sniziti visine centra valjanja, a da pri tome ostale značajke isto tako budu usklađene kako bi se dobile želje karakteristike. Snižavanjem centara valjanja, djelovalo se i na promjene značajki kao što je bočni nagib kotača te promjenu širine traga kotača. Snižavanjem visine centra valjanja povećalo se je valjanje vozila pri prolasku kroz zavoj, no time se nisu ugrozila vozna svojstva. Osim promjena ovih triju značajki, napravljene su izmjene i kod značajki koje utječu na upravljanje vozila, kao što su uzdužni nagib osi zakretanja kotača, bočni nagib osi zakretanja kotača te je napravljena konstrukcijska izmjena kako bi se dobile i anti-značajke. Osim navedenih izmjena letva volana je postavljena na preporučeno mjesto iz literature, točnije ispred kotača, ali je postavljena vrlo nisko kao što je prikazano na slici 77.



Slika 77. Prednji ovjes modela Arctos 3.0



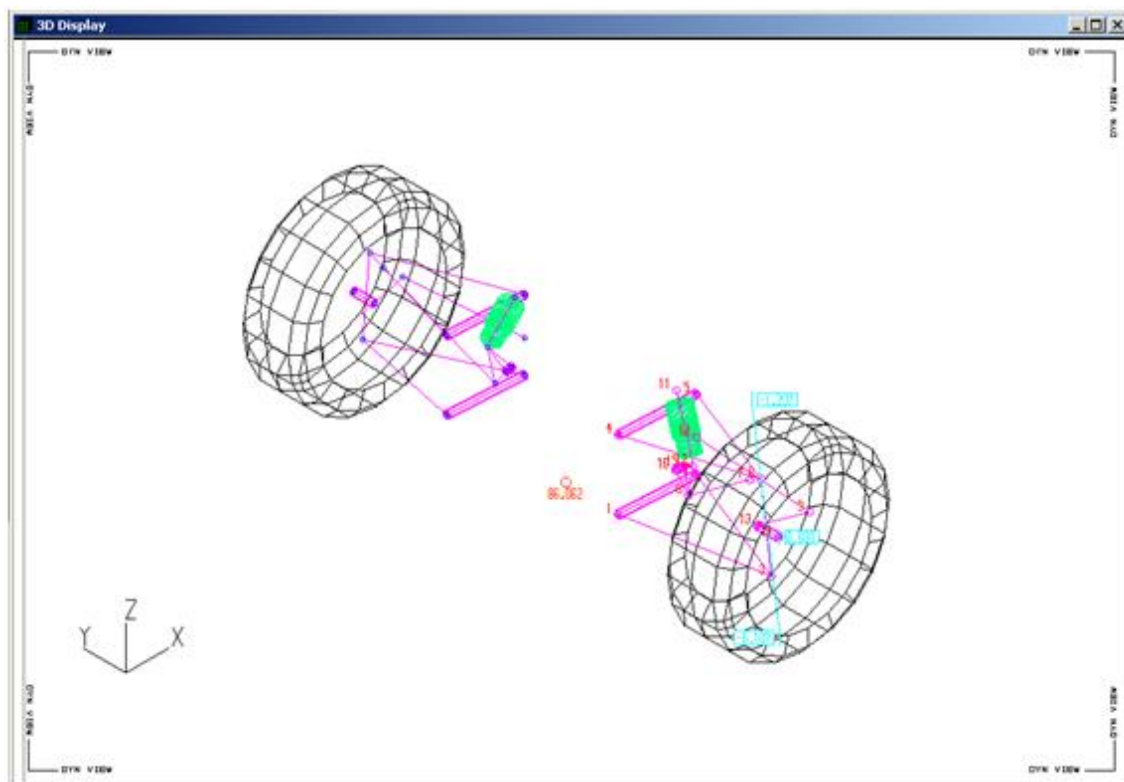
Slika 78. Promjene geometrijskih značajki prednjeg ovjesa za model Arctos 3.0

Tablica 12. Promjene geometrijskih značajki prednjeg ovjesa za model Arctos 3.0

Vertikalni hod kotača (mm)	Bočni nagib kotača (°)	Otvorenost/zatvore nost kotača (°)	Uzdužni nagib osi zakretanja kotača (°)	Bočni nagib osi zakretanja kotača (°)	Anti Dive-značajka (%)	Visina Središta valjanja od tla (mm)	Promjena traga kotača (mm)	Promjena međuosovinskog razmaka (mm)
-30	0.2214	-1.4391	8.7136	8.0279	10.93	212.9	-4.63	-0.85
-27,5	0.2057	-1.3122	8.704	8.0626	11.06	119.22	-4.16	-0.78
-25	0.1895	-1.1866	8.6944	8.0976	11.18	115.37	-3.71	-0.72
-22,5	0.1728	-1.0625	8.6848	8.1329	11.31	111.52	-3.27	-0.65
-20	0.1556	-0.9396	8.6753	8.1685	11.43	107.67	-2.85	-0.58
-17,5	0.1379	-0.818	8.6657	8.2045	11.56	103.83	-2.44	-0.51
-15	0.1197	-0.6976	8.6562	8.2407	11.69	99.99	-2.04	-0.44
-12,5	0.101	-0.5785	8.6467	8.2772	11.82	96.15	-1.67	-0.37
-10	0.0818	-0.4606	8.6372	8.3141	11.95	92.32	-1.3	-0.29
-7,5	0.0621	-0.3438	8.6278	8.3513	12.08	88.48	-0.95	-0.22
-5	0.0419	-0.2281	8.6183	8.3888	12.21	84.65	-0.62	-0.15
-2,5	0.0212	-0.1135	8.6089	8.4266	12.34	80.83	-0.3	-0.07
0	0	0	8.5995	8.4647	12.48	77	0	0
2,5	-0.0217	0.1125	8.5901	8.5031	12.61	73.18	0.29	0.07
5	-0.0438	0.2239	8.5807	8.5419	12.75	69.36	0.56	0.15
7,5	-0.0664	0.3344	8.5713	8.581	12.89	65.54	0.82	0.22
10	-0.0896	0.4439	8.562	8.6204	13.03	61.72	1.07	0.3
12,5	-0.1132	0.5525	8.5527	8.6602	13.17	57.9	1.29	0.38
15	-0.1372	0.6602	8.5433	8.7003	13.31	54.08	1.51	0.45
17,5	-0.1618	0.7669	8.534	8.7407	13.45	50.27	1.71	0.53
20	-0.1869	0.8728	8.5248	8.7815	13.6	46.46	1.89	0.61
22,5	-0.2124	0.9779	8.5155	8.8226	13.74	42.65	2.07	0.68
25	-0.2384	1.0821	8.5063	8.8641	13.89	38.83	2.22	0.76
27,5	-0.2649	1.1855	8.4971	8.906	14.04	35.02	2.36	0.84
30	-0.2919	1.2881	8.4879	8.9481	14.19	31.21	2.49	0.91

Tablica 13. Karakteristične točke prihvata stražnjeg ovjesa Arctos 3.0

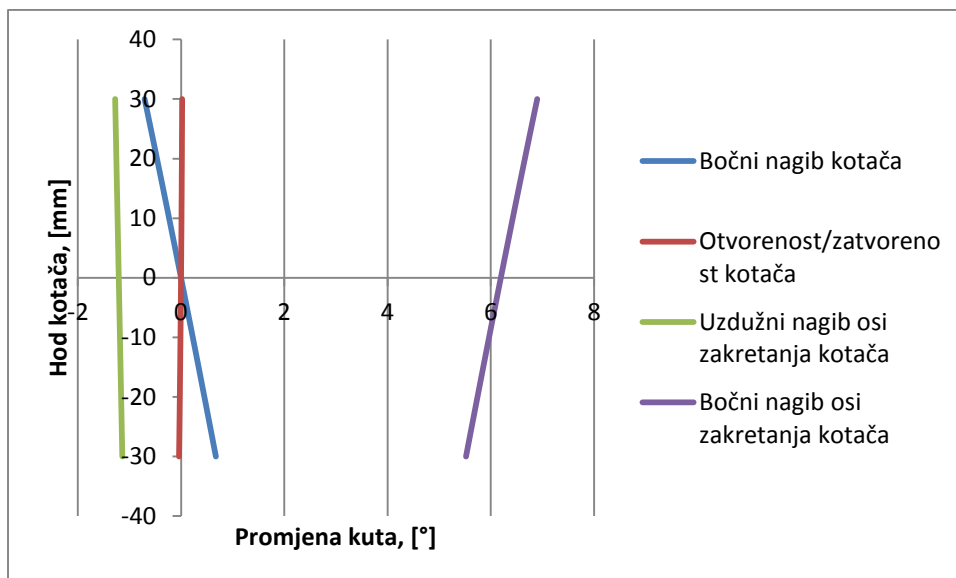
Stražnji ovjes				
Točka	x(mm)	y(mm)	z(mm)	Značenje
POINT:1	1501	-253,85	180,9	Donje rame – prednji prihvata
POINT:2	1731,96	-253,83	167,84	Donje rame – stražnji prihvata
POINT:3	1603	-603,77	147,59	Donje rame – prihvata rukavca
POINT:4	1501	-254	384	Gornje rame – prednji prihvata
POINT:5	1731,96	-254	373	Gornje rame – stražnji prihvata
POINT:6	1598	-578	385	Gornje rame – prihvata rukavca
POINT:7	1601,75	-541,65	362,88	Spona amortizera / opruga – prihvata ramena
POINT:8	1676,3	-285,86	157,92	Spona amortizera / opruga – prihvata klackalice
POINT:9	1719,46	-601	251	Spona letve volana – prihvata rukavca
POINT:10	1731,96	-253,96	262,41	Spona letve volana – prihvata letve volana
POINT:11	1688,07	-238,7	396,35	Amortizer/ opruga – prihvata rešetka
POINT:12	1672	-304,25	244,34	Amortizer / opruga – prihvata klackalice
POINT:13	1600	-566	260	Osovina kotača
POINT:14	1600	-627,3	260	Središte kotača
POINT:15	1694,57	-254,93	207	Os klackalice prva točka
POINT:16	1672,43	-249,51	207,19	Os klackalice druga točka



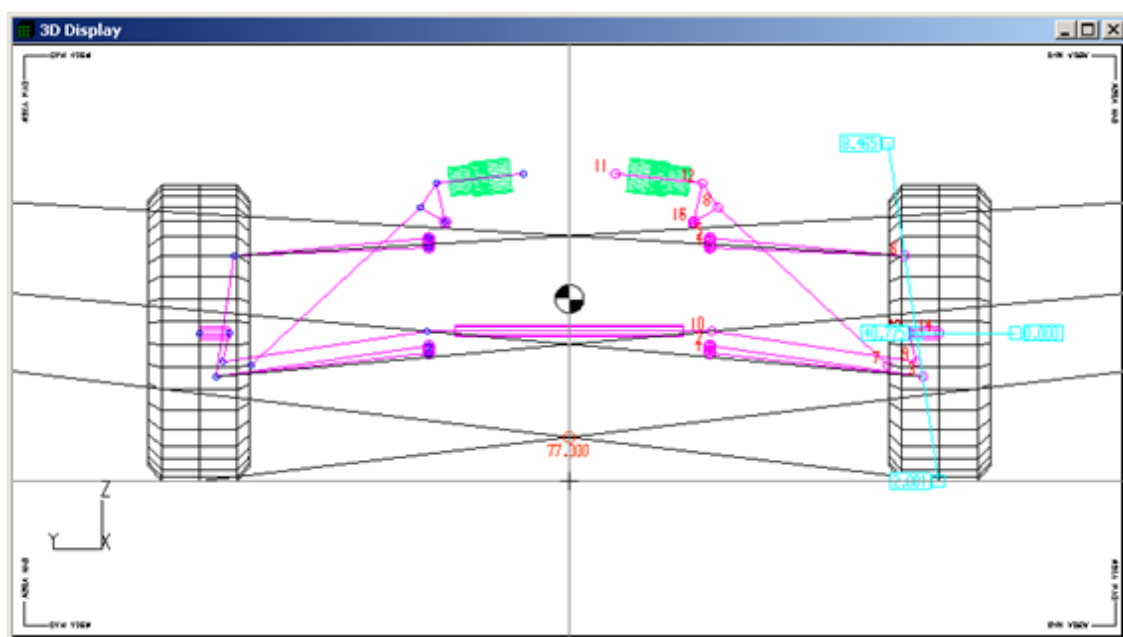
Slika 79. Stražnji ovjes modela Arctos 3.0

Tablica 14. Promjene geometrijskih značajki modela Arctos 3.0

Vertikalni hod kotača (mm)	Bočni nagib kotača (°)	Otvorenost/zatvore nost kotača (°)	Uzdužni nagib osi zakretanja kotača (°)	Bočni nagib osi zakretanja kotača (°)	Anti Squat-značajka (%)	Visina Središta valjanja od tla (mm)	Promjena traga kotača (mm)	Promjena međuosovinskog razmaka (mm)
-30	0.675	-0.0384	-1.1377	5.5206	24.05	137.7	-5.37	-1.57
-27,5	0.6196	-0.0345	-1.1434	5.5759	24.21	133.35	-4.82	-1.44
-25	0.5641	-0.0307	-1.1491	5.6314	24.37	129.01	-4.3	-1.31
-22,5	0.5085	-0.0271	-1.1548	5.687	24.53	124.68	-3.79	-1.18
-20	0.4527	-0.0236	-1.1605	5.7427	24.7	120.36	-3.3	-1.05
-17,5	0.3967	-0.0202	-1.1663	5.7986	24.86	116.05	-2.82	-0.92
-15	0.3406	-0.017	-1.172	5.8547	25.03	111.74	-2.37	-0.78
-12,5	0.2843	-0.0139	-1.1777	5.9109	25.21	107.45	-1.93	-0.65
-10	0.2278	-0.0108	-1.1835	5.9674	25.38	103.16	-1.51	-0.52
-7,5	0.1711	-0.008	-1.1892	6.024	25.56	98.87	-1.11	-0.39
-5	0.1143	-0.0052	-1.195	6.0808	25.74	94.6	-0.72	-0.26
-2,5	0.0573	-0.0025	-1.2007	6.1378	25.92	90.33	-0.35	-0.13
0	0	0	-1.2065	6.195	26.11	86.06	0	0
2,5	-0.0575	0.0024	-1.2123	6.2524	26.3	81.8	0.33	0.13
5	-0.1151	0.0047	-1.2181	6.3101	26.49	77.55	0.65	0.26
7,5	-0.1731	0.0069	-1.2238	6.3679	26.69	73.3	0.95	0.39
10	-0.2312	0.009	-1.2296	6.426	26.89	69.06	1.23	0.52
12,5	-0.2896	0.0109	-1.2354	6.4844	27.09	64.82	1.5	0.65
15	-0.3482	0.0128	-1.2412	6.543	27.29	60.59	1.75	0.78
17,5	-0.4071	0.0145	-1.247	6.6019	27.5	56.36	1.98	0.91
20	-0.4662	0.0161	-1.2529	6.661	27.71	52.14	2.2	1.04
22,5	-0.5256	0.0176	-1.2587	6.7204	27.93	47.92	2.39	1.17
25	-0.5853	0.019	-1.2645	6.78	28.15	43.71	2.58	1.3
27,5	-0.6453	0.0202	-1.2703	6.84	28.37	39.49	2.74	1.43
30	-0.7056	0.0214	-1.2762	6.9003	28.6	35.29	2.89	1.56

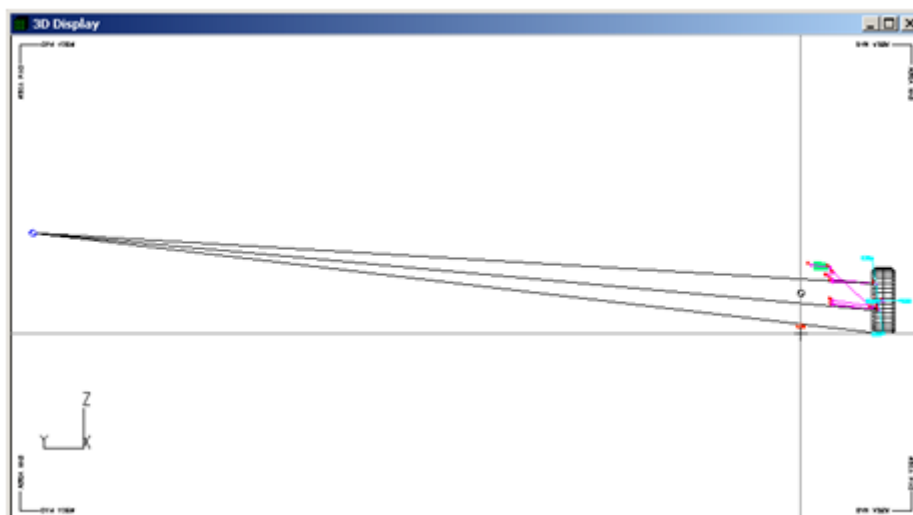


Slika 80. Promjena geometrijski značajki stražnjeg ovjesa modela Arctos 3.0

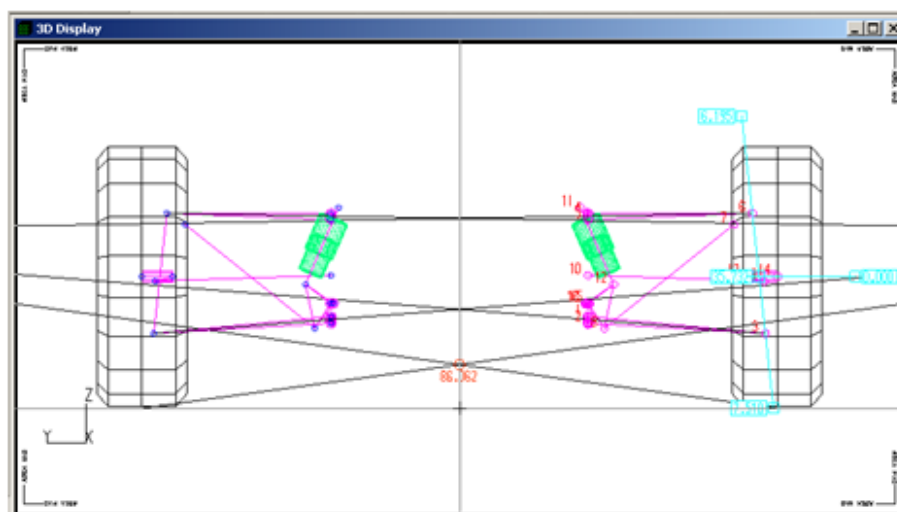


Slika 81. Prednji pogled prednjeg ovjesa modela Arctos 3.0

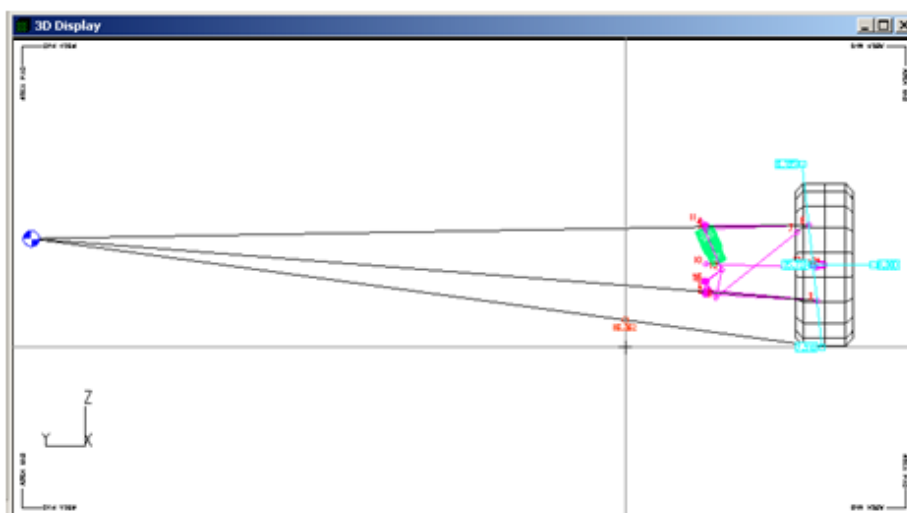
Pogledom na sliku 81. se može uočiti da u kadar nisu uhvaćena trenutna središta rotacije nego su samo vidljive konstrukcijske linije, kao što se to može vidjeti na slici 74. (žuti krugovi sa crnim ispunjenjem) kod modela Arctos 1.0, što znači da ovaj model ima malu promjenu geometrijskih značajki uslijed promjene hoda kotača jer je krak vrlo dugačak te je potreban veliki hod kotača kako bi došlo i do velike promijene, konkretno bočni nagib kotača se mijenja vrlo malo, a isto tako je smanjena promjena širine traga kotača. Stvarni položaj trenutnog središta rotacije je prikazana na slici 82. Ista situacija je i kod stražnjeg ovjesa, trenutna središta rotacije su udaljenija nego što su bila na modelu Arctos 1.0.



*Slika 82. Položaj trenutnog središta rotacije*

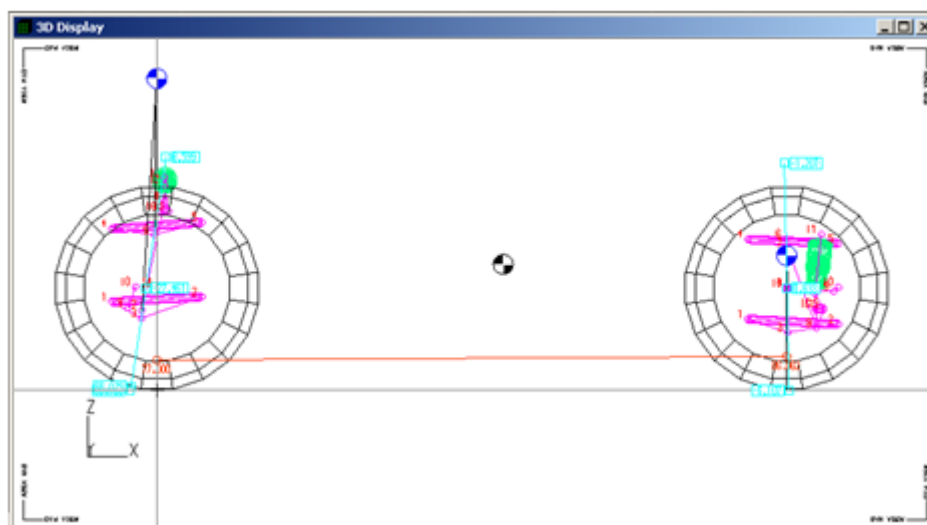


*Slika 83. Prednji pogled stražnjeg ovjesa modela Arctos 3.0*





Slika 84. Položaj trenutnog središta rotacije za stražnji ovjes



Slika 85. Bočni pogled oba ovjesa modela Arctos 3.0

### 6.3. Usporedba modela

Nakon grafičkog prikaza napravljenih izmjena na modelima, slijedi i usporedba vrijednosti pojedinih parametara u tablici 15.

Tablica 15. Usporedba geometrijski značajki modela

Značajka	Arctos 1.0	Arctos 3.0
Prednji ovjes		
Bočni nagib kotača	0°	0°
Bočni nagib osi zakretanja kotača	6,71°	8,46°
Uzdužni nagib osi zakretanja kotača	4,71°	8,6°
Otvorenost/zatvorenost kotača	0°	0°
Polumjer zakretanja kotača	14,38 mm	2,08 mm
Anti-dive	-1,08 %	12,48 %
Stražnji ovjes		
Bočni nagib kotača	0°	0°
Bočni nagib osi zakretanja kotača	2,261°	6,2°
Uzdužni nagib osi zakretanja kotača	0°	-1,21°
Otvorenost/zatvorenost kotača	0°	0°
Polumjer zakretanja kotača	11,097 mm	7,51 mm

Anti-squat	-0,38 %	26,11 %
------------	---------	---------

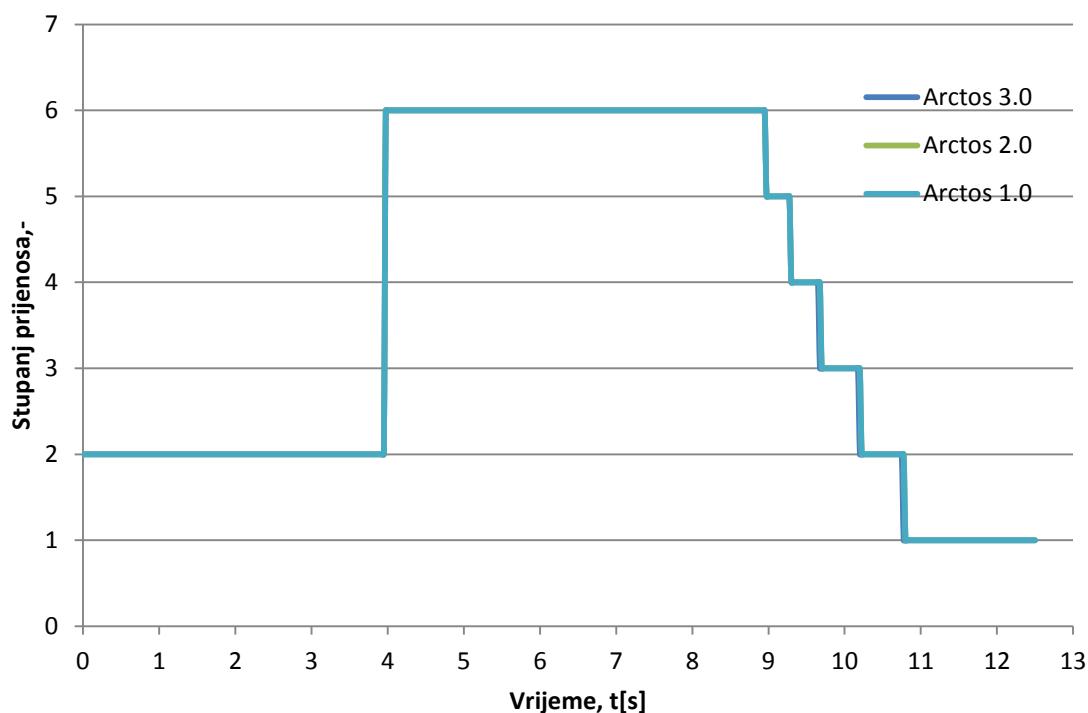
Pogledom na tablicu 15. uviđaju se razlike u parametrima, prije svega potrebno je napomenuti da se konstrukcijski može izvesti geometrija tako da se određene značajke mogu podešavati naknadno, odnosno prema potrebi kako bi se dobile željene vozna karakteristike. U ovom slučaju vrijednosti koje su kod oba modela navedene kao nula ( $0^\circ$ ) se mogu podešavati, znači bočni nagib kotača i otvorenost/zatvorenost kotača. Značajka koja se još može naknadno podešavati u trkaćem svijetu je uzdužni nagib osi zakretanja kotača, no to ovisi o konstrukcijskoj izvedbi glavčine. Prva dva parametra koja su spomenuta su ujedno u korelaciji, prema preporuci [7] ukoliko postoji vrijednost statičkog bočnog nagiba kotača, vrijednost otvorenosti/zatvorenosti iznosi 10% od iznosa statičkog bočnog nagiba kotača. Naravno to nije pravilo jer se sve na vozilu podešava prema potrebi, no ovo je preporuka. Otvorenost/zatvorenost kotača se podešava ovisno o tipu trkaće staze na kojoj se vozi, odnosno koliko je staza zavojita. Preporuke koje su još korištene a navedene su u ovoj tablici su uzdužni nagib osi zakretanja kotača koji na prednjoj osovini treba uvijek biti pozitivan i pozicioniran ispred središta kotača kako bi se osiguralo bolje vođenje vozila tokom vožnje. Kod stražnje osovine je drukčija situacija, nagib treba biti negativan ukoliko je geometrija ovjesa tako izvedena i treba biti iza središta kotača. Što se tiče same promjene uzdužnog nagiba osi zakretanja kotača ona nije poželjna, barem ne u velikom iznosu, jer utječe na promjenu međuosovinskog razmaka vozila, na raspodjelu mase, te utječe na upravljivost vozila, odnosno na promjenu bočnog nagiba kotača za vrijeme skretanja. Preporučena vrijednost iznosa uzdužnog nagiba osi zakretanja kotača od  $3^\circ$  do  $9^\circ$  [8]. Bočni nagib osi zakretanja kotača je značajka koja utječe isto tako na upravljivost vozila, te svojim nagibom je povezana sa polumjerom zakretanja kotača. Što je nagib veći, to je i polumjer zakretanja veći, no ukoliko su prihvatilice vodilica sa glavčinom dovoljno udaljeni iznos polumjera zakretanja se može smanjiti, te time olakšati i skretanje vozila. Preporučeni iznos je do  $8^\circ$  [3] jer sve vrijednosti preko te negativno utječu na upravljivost. U modelu je taj iznos nešto veći od preporučenoga, no nema bitnog narušavanja svojstava upravljanja. Anti značajke, anti-dive i anti-squat su svakako poželjne, jer pomoću njih se može smanjiti propinjanje ili poniranje vozila tijekom ubrzavanja ili usporavanja. Na modelu Arctos 3.0 su konstrukcijski dobivene te značajke te imaju utjecaj u kretanju vozila. Preporučene vrijednosti su do 30 % za anti-dive značajku, te do 40% za anti-squat značajku[9]. Dobivene vrijednosti su niže, no zbog kompromisa koji je potrebno učiniti pri konstruiranju zbog ostalih značajki nisu postignute maksimalne preporučene vrijednosti.

## 7.Rezultati simulacije modela

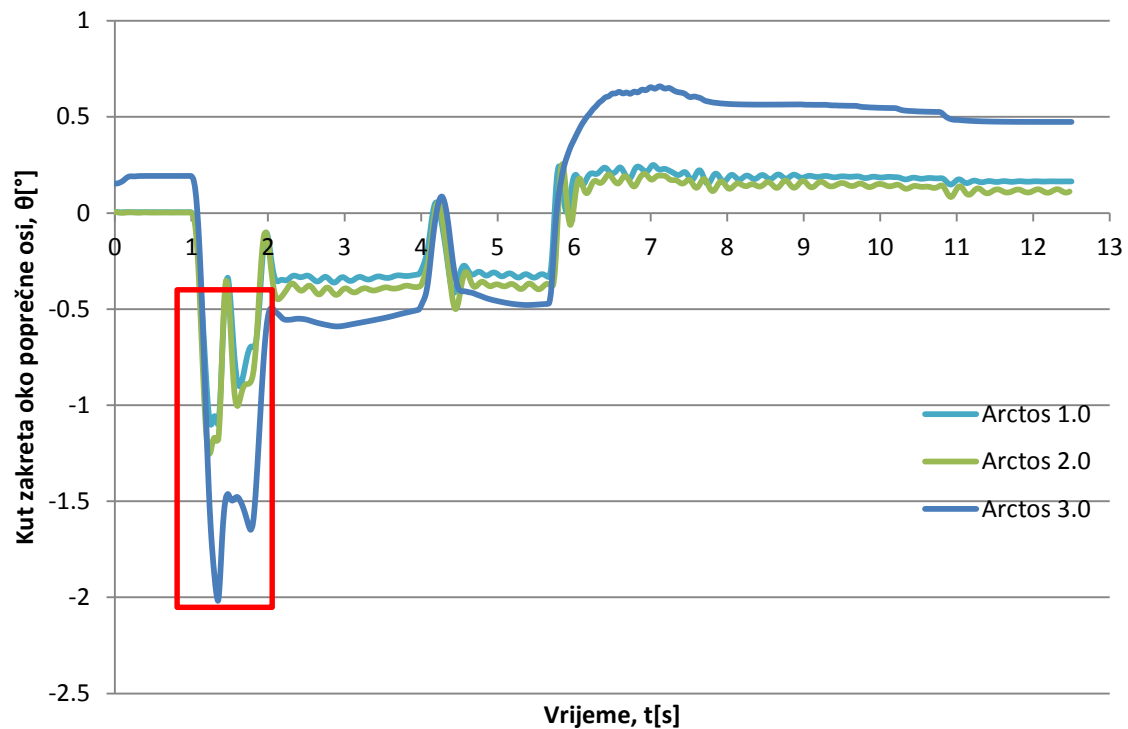
Ovo poglavlje će se osvrnuti na rezultate dobivene nakon provedene simulacije spomenutih modela u različitim procedurama, pri tome će rezultati simulacija detaljnije objašnjeni. U simulacijama će se uspoređivati tri različita modela, Arctos 1.0, Arctos 2.0 te Arctos 3.0. Sva tri modela su različita s time da geometrija Arctosa 2.0 i Arctosa 3.0 je identična, a razlika je u aktivnim prigušnim elementima, odnosno u karakteristici opruge i amortizera. Arctos 1.0 ima karakteristiku opruge i amortizera kakva je na trenutnom modelu, takva je situacija i na modelu Arctosu 2.0, dok je na Arctos 3.0 dodana proračunata karakteristika opruge i amortizera koja je predviđena za takvo vozilo kada se uzme u obzir nova geometrija ovjesa[11].

### 7.1. Procedura "ubrzavanje i usporavanje"

U ovoj proceduri je cilj postići što prije brzinu od 100 km/h iz mirnog položaja, te je potrebno što prije stati i postići što kraći zaustavni put. Vozilo kreće iz drugog stupnja prijenosa, što je prikazano na slici 86. Takav način kretanja je zapisan u samoj proceduri. S obzirom da bolidi posjeduju ista mehanička svojstva, odnosno snaga motora, prijenosni omjeri u mjenjaču su isti stoga na ovoj slici nije uočljiva bitna razlika.

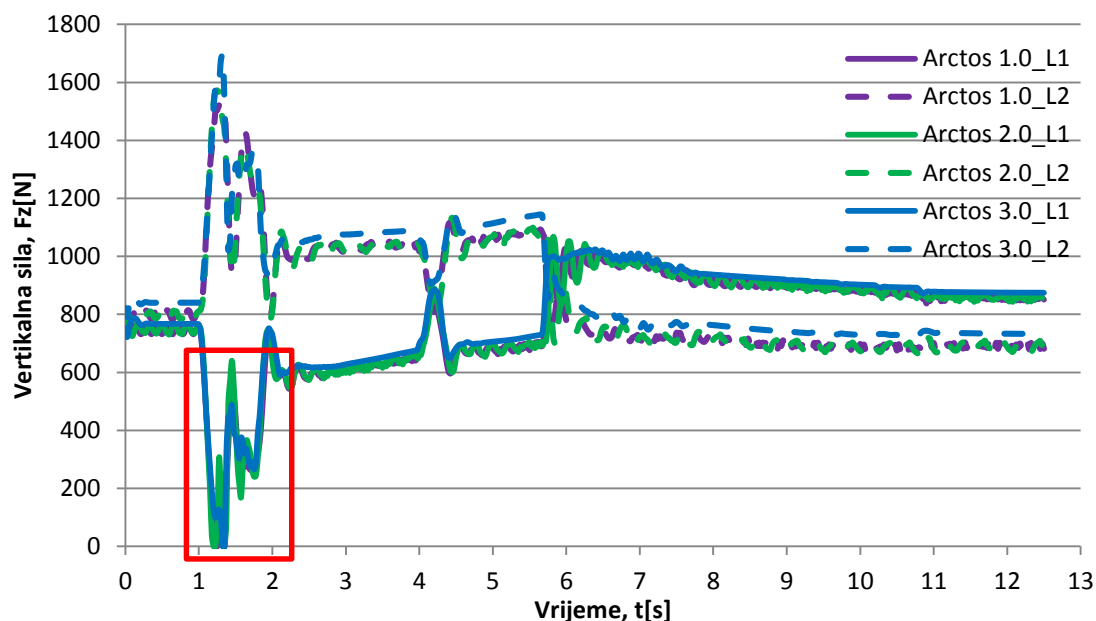


Slika 86. Stupanj prijenosa

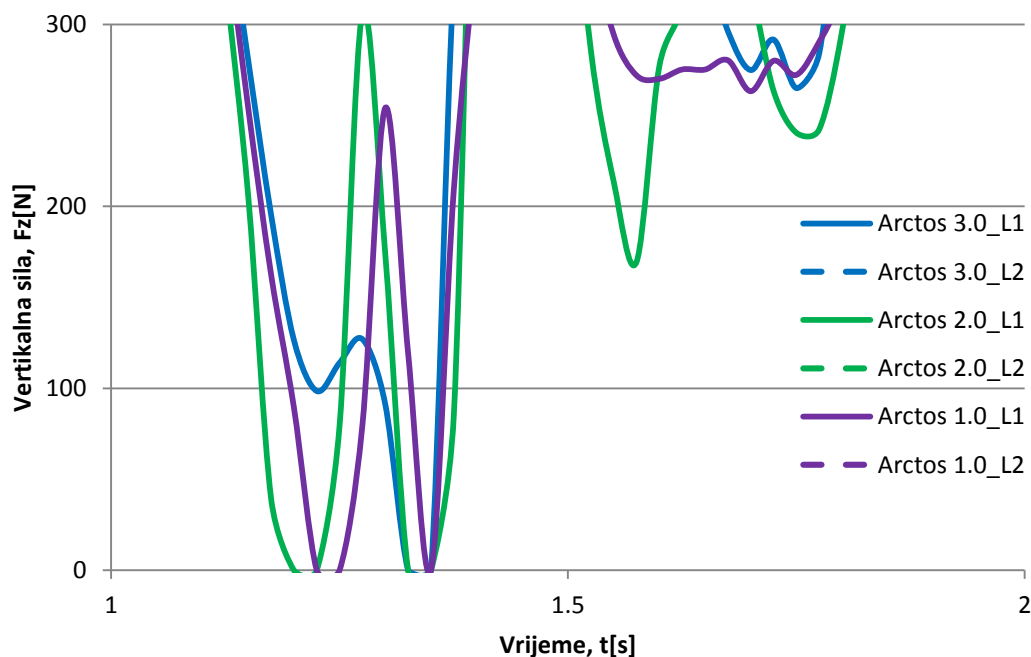


*Slika 87. Kut zakreta oko poprečne osi vozila*

Na slici 87. je prikazana usporedba promjene kuta zakreta oko poprečne osi vozila uslijed gibanja, odnosno propinjanje i poniranje vozila. Na slici je poniranje vozila prikazano kada je krivulja pojedinog bolida u pozitivnom području i to se događa kad vozilo koči, odnosno usporava. Vozilo se propinje pri ubrzavanju te se onda krivulja pojedinog vozila nalazi u negativnom području. Ako se promotri slika vidljivo je da se model Arctos 3.0 propinje najviše od svih (uokvireno crveno), te nakon toga slijedi model Arctos 1.0 i zatim Arctos 2.0. Razlog tolikoj razlici je u kutu propinjanja je to što prema proračunu model Arctos 1.0 ima vrlo tvrdi karakteristiku opruge te sama geometrija ovjesa nema nikakvog utjecaja u prigušivanju, dok kod modela Arctos 2.0 utječu geometrija ovjesa i karakteristika opruge koja je isto tako vrlo kruta kao i kod modela Arctos 1.0, no zbog anti-značajki koje posjeduje geometrija ovjesa model najmanje ponire. Model Arctos 3.0 ima proračunatu oprugu koja ima mekaniju karakteristiku. Potrebno je napomenuti da model Arctos 1.0 i Arctos 2.0 zbog karakteristike opruge nisu relevantni jer da bi došlo do većeg kuta zakreta oko poprečne osi potrebna je velika sila. Slika 88. prikazuje djelovanje vertikalnih sila na bolid, te se u njima može vidjeti isto tako da u određenim trenucima prednji kotači izgube kontakt sa podlogom, slika 89. Zbog jednostavnijeg prikaza u slici su prikazani samo kotači sa lijeve strane svih triju bolida. Ako se usporede slika 87. i slika 89. može se zaključiti kako se najveće propinjanje događa u trenutku kada prednji kotači gube kontakt sa podlogom, što je ujedno i sam početak procedure. Kao što je već rečeno uzrok ovome je neprikladna geometrija ovjesa i tvrda karakteristika opruge. Isto tako se može primijetiti i porast vertikalne sile na zadnjim kotačima uslijed propinjanja prednjeg dijela bolida i to kod sva tri modela.



Slika 88. Vertikalne sile



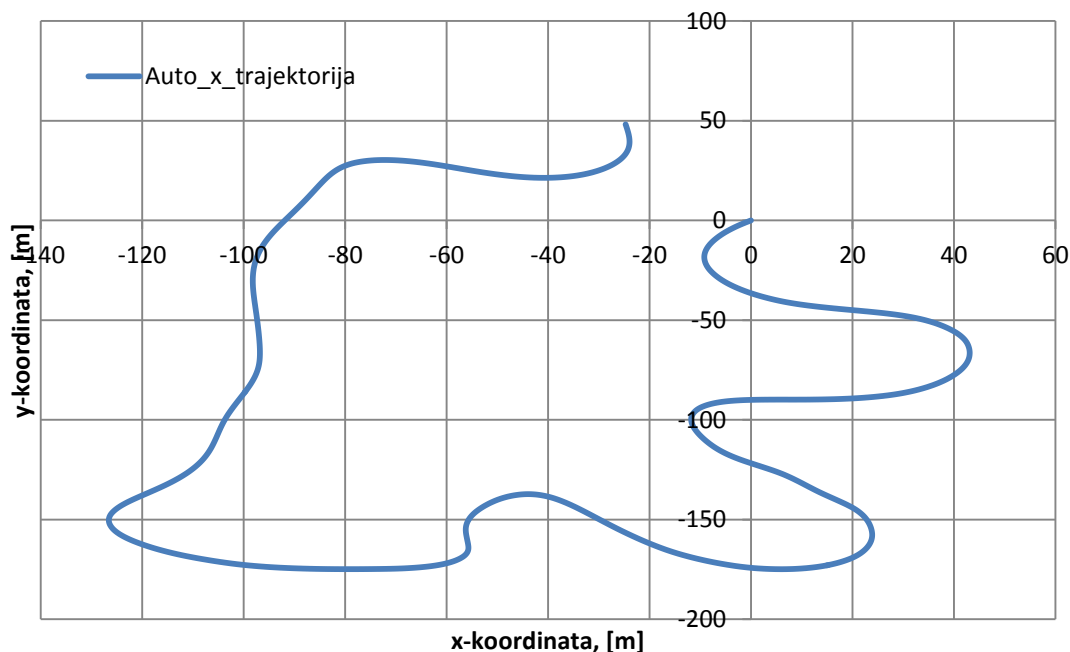
Slika 89. Gubitak kontakta s podlogom

Uspoređujući modele kroz navedene dijagrame, moguće je primijetiti da model Arctos 2.0 ima dobre rezultate, pri kretanju, točnije da se ne propinje kao model Arctos 3.0 i ne gubi kontakt sa podlogom na prednjim kotačima, slika 89., no pri kočenju ponire manje od svih, što je zasluga anti-značajki čak i sa tvrdom karakteristikom opruge. Karakteristika poniranja nikako nije poželjna jer velikom promjenom kuta poniranja postoji mogućnost da vozilo dodirne sa prednjim krajem tlo i javlja se nepoželjna reakcija i može doći do štetnih posljedica. Niti jedna od tih pojava svakako nije poželjna no propinjanje vozila se može riješiti "otvrdnjavanjem" opruga jer se radi pomaku na

stražnjoj osovini i te ona nema toliki utjecaj na upravljanje, dok recimo "otvrđnjavanje" na prednjoj osovini bi imalo utjecaj na upravljivost bolida što se naravno nikako ne želi, stoga je potrebno više pozornosti skrenuti pri konstruiranju prednjeg ovjesa nego stražnjeg.

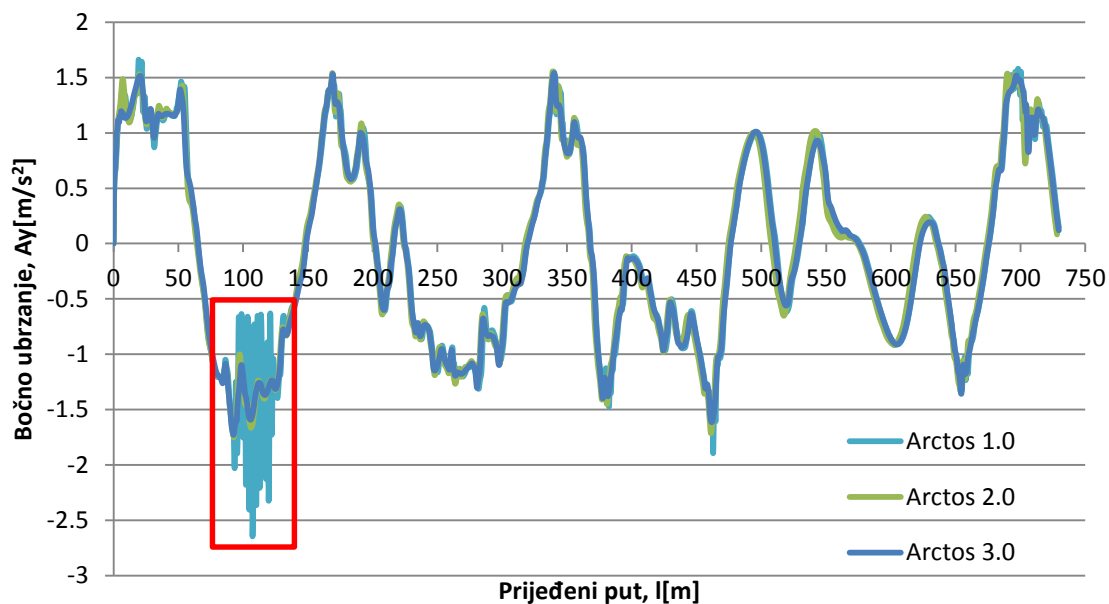
## 7.2. Procedura "Autokros"

U ovoj proceduri vozilo se kreće unaprijed definiranom putanjom koja se sastoji od zavoja kako bi se ispitala dinamička sposobnost vozila, odnosno ponašanje u zavojima. Trajektorija je prikazana na slici 90.

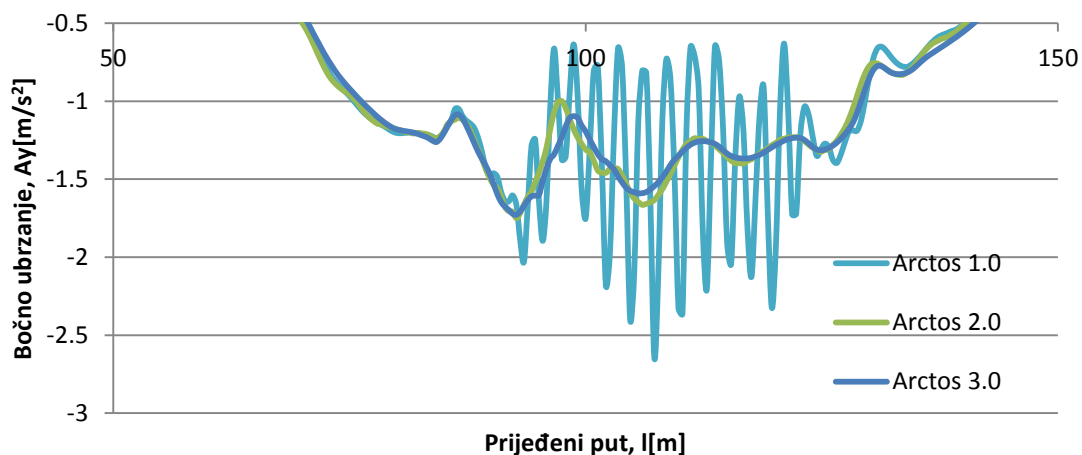


Slika 90. Trajektorija procedure "Autokros"

Kao što je već rečeno, ovo je unaprijed definirana putanja po kojoj se bolid kreće te je gibanje vozila tranzijentno, odnosno da putanja obiluje zavojima i promjenom brzine vožnje. Na slici 91. se mogu uočiti promjene bočnog ubrzanja bolida. Potrebno je napomenuti kako je karakteristika vozača namještena tako da vozač može savladati zavoj pri bočnom ubrzanju do 1,4g, no kao što je vidljivo iz slike 91. ono čak doseže i do 1,6g što je naravno i više od predviđenoga. Što se tiče samog bočnog ubrzanja, sva tri modela mogu postići zadanu vrijednost, čak i više, osim kod modela Arctos 1.0 kod kojeg se u određenom trenutku javlja vrlo veliko titranje (slika 9292.) što ujedno rezultira i vrijednostima od 2,6g, no tomu nije razlog geometrija ovjesa već prigušni elementi koji su već spomenuti.

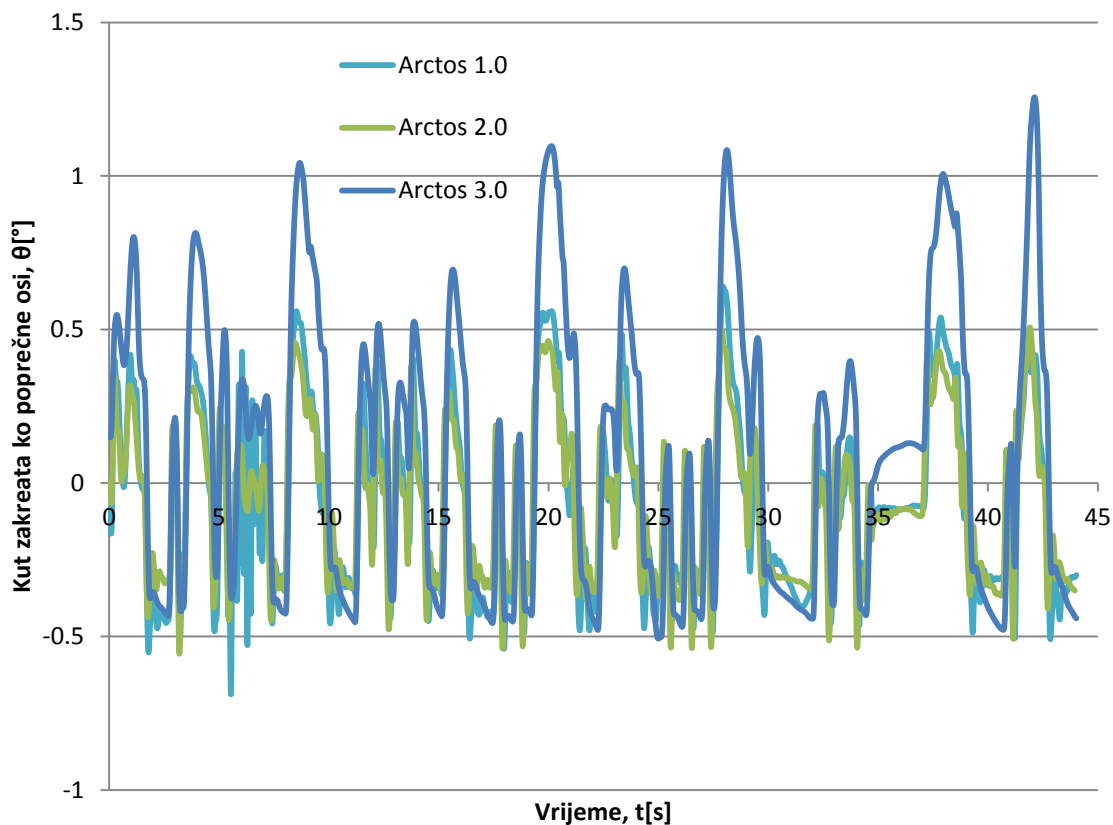


Slika 91. Bočno ubrzanje



Slika 92. Titranje kotača

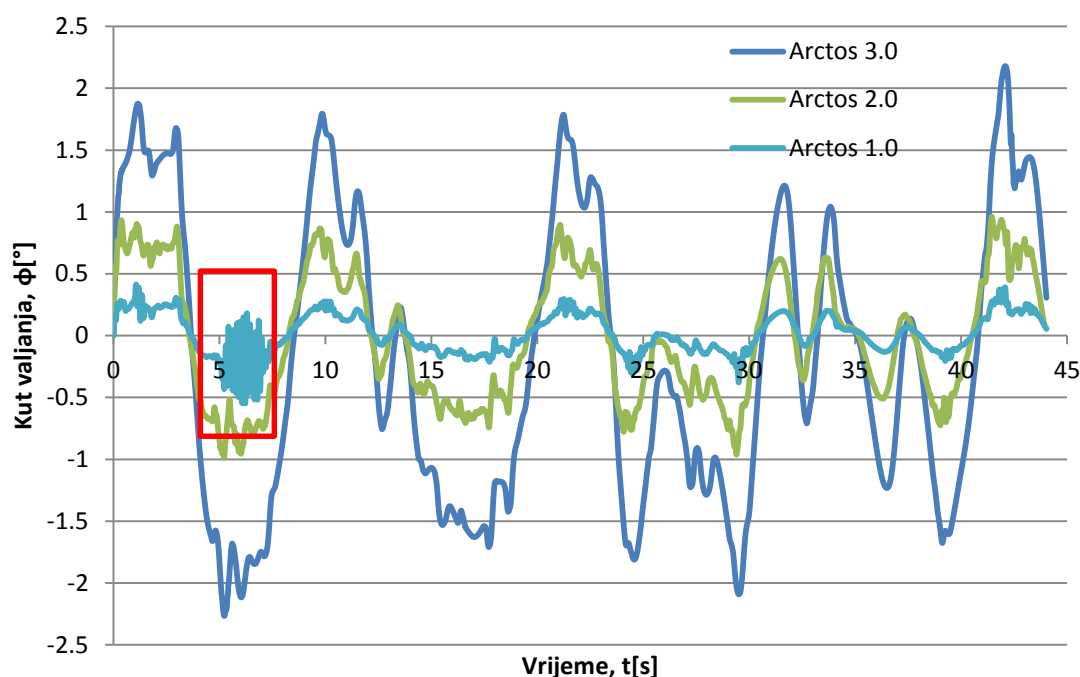
Promjena kuta zakreta oko poprečne osi koja se javlja pri izvođenju ove procedure je prikazana na slici 93. Vidljivo je da model Arctos 2.0 kao i do sada ima najmanju promjenu, no tomu su razlog prigušni elementi te geometrija ovjesa, no ako se promotri bolid Arctos 3.0 kod njega se uočavaju velike amplitude u promjeni kuta u odnosu na ostale modele, odnosno propinjanja i poniranja. Usporedbom tih dvaju modela Arctos 2.0 i Arctos 3.0 se može zaključiti da je geometrija ovjesa koju koriste ti modeli dobra iz raloa što unatoč tvrđoj karakteristici opruga promjena kuta zakreta se smanjila kod modela Arctos 2.0, dok je na modelu Arctos 3.0 ta promjena veća samo iz razloga što ima proračunate opruge koje imaju mekaniju karakteristiku.



*Slika 93. Promjena kuta propinjanja*

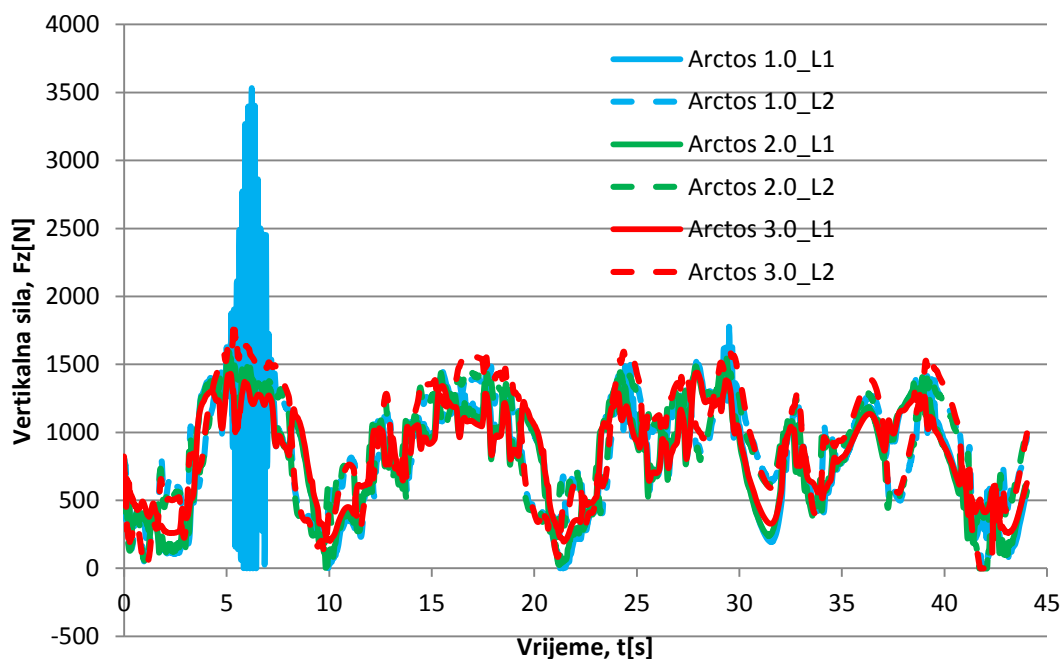
Model Arctos 3.0 pokazuje željene rezultate jer se vidi utjecaj anti-značajki i proračunatih prigušnih elemenata te nisu uočljive značajnije promjene uslijed tranzijentnog gibanja, što ujedno rezultira bržim i u konačnici boljim rezultatima. Sljedeća karakteristika koja je bitna i koja se može postići dobrom konstrukcijom geometrije ovjesa je valjanje vozila oko uzdužne osi. Slika 93. prikazuje dobivene rezultate nakon simuliranja sva tri bolida. Od sva tri modela Arctos 3.0 ima najveću promjenu kuta valjanja. Uzrok tomu je vrlo nisko postavljena os valjanja u odnosu na težište vozila te se vozilo zbog velikog momenta koji se javlja uslijed pojave centrifugalne sile valja više od ostalih. Dobra strana ove promjene je raspodjela težine vozila za vrijeme valjanja vozila kojom se osigurava bolja stabilnost vozila. Kod modela Arctos 1.0 je promjena kuta valjanja vrlo mala jer je os valjanja postavljena visoko, odnosno puno bliže težištu vozila te samim time se pri pojavi centrifugalne sile pri prolasku kroz zavoj javlja manji moment koji djeluje na vozilo i te je manja promjena kuta valjanja. Model Arctos 2.0 se valja manje od modela Arctos 3.0 jer posjeduje tvrđu karakteristiku opruge a geometriju ovjesa kao model Arctos 3.0, no to je i dalje više od modela Arctos 1.0, a razlog tomu je nisko postavljeni centri valjanja osovina osovina na vozilu, no i dalje je to u skladu sa uputama i prijedlozima iz literature[3].





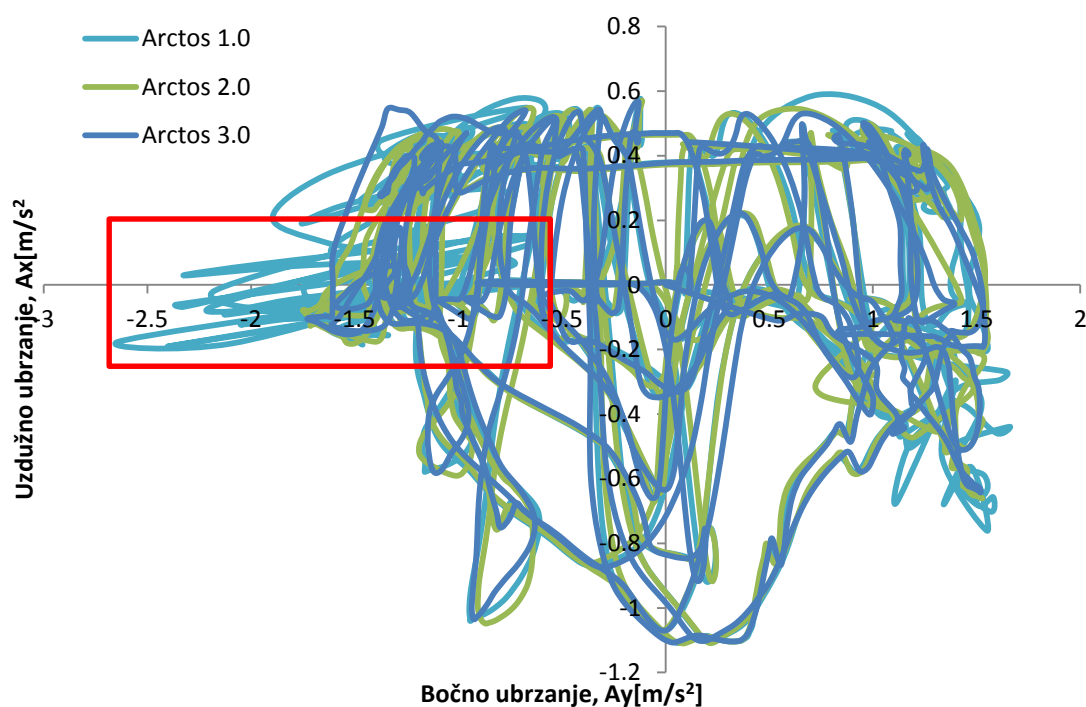
Slika 94. Promjena kuta valjanja

Anomalija koja se javlja između pete i desete sekunde (uokvireno crveno) je povezana sa prigušnim elementima modela Arctos 1.0, koji su već spomenuti pri analizi bočnog ubrzanja kod slike 90. Uzrok tomu titranju je velika amplituda pri promjeni vertikalne sile pri prolasku kroz zavoj te je očiti uzrok tomu preveliko opterećenje te nemogućnost prigušnih elemenata da obave svoju funkciju zbog loše, odnosno tvrde karakteristike. Slika 95. pokazuje amplitudu vertikalne sile zbog koje nastaje ranije spomenuta anomalija.



Slika 95. Vertikalne sile

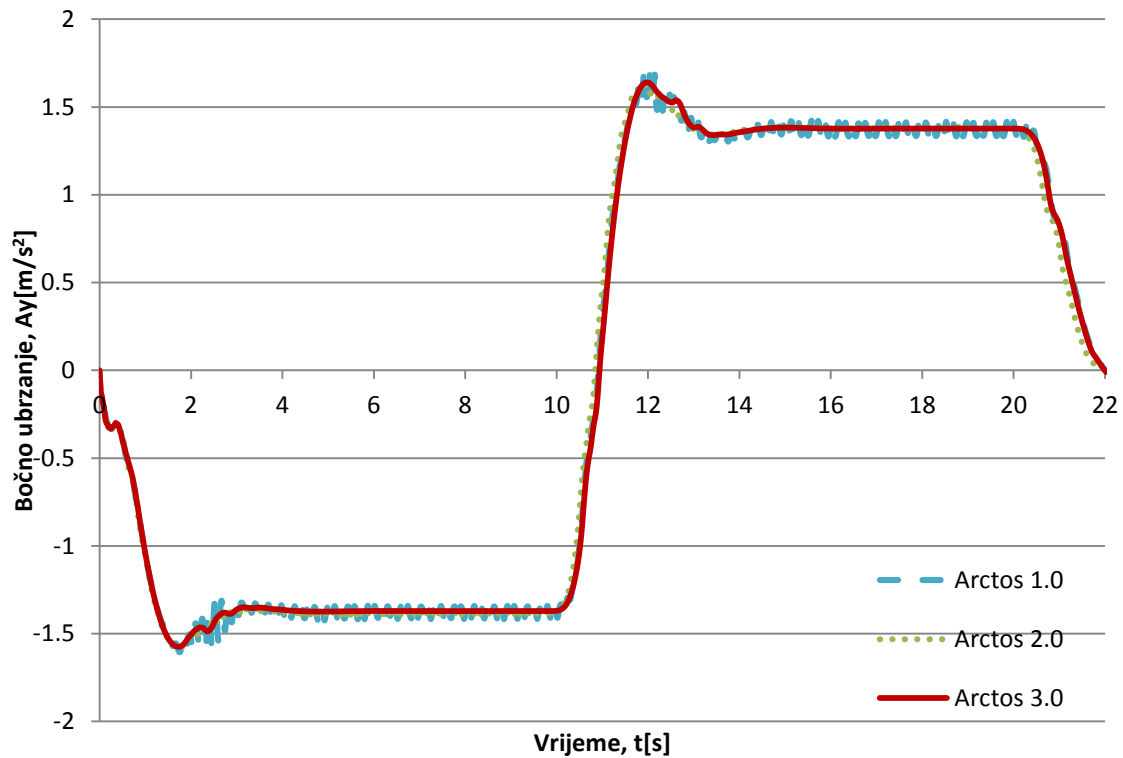
Dijagram koji se prikazan na slici 96. je tzv. "G-metar". On prikazuje ovisnost uzdužnog ubrzanja o bočnom ubrzanju. Njime se može zaključiti koliko je vozilo stabilno te se mogu prikazati granični uvjeti u kojima se može kretati vozilo. Na apscisi se nalazi bočno ubrzanje, dok se na ordinati nalazi uzdužno ubrzanje. Bočno ubrzanje, kao što je već rečeno prikazuje kolikom akceleracijom može vozilo proći kroz zavoj a da ne izleti, dok uzdužno ubrzanje prikazuje iznos kojim vozilo može ubrzavati ili usporavati. Zaključak koji se može izvesti gledajući sliku 96. je da su sva tri modela stabilna pri zadanim uvjetima vožnje, osim modela Arctos 1.0 koji zbog već navedene anomalije isto tako ima određen odmak od očekivanih rezultata, ali ga u konačnici ne narušava (uokvireno crveno na slici 96.). To je isto pojava kao i na slici 90.



Slika 96. G-metar

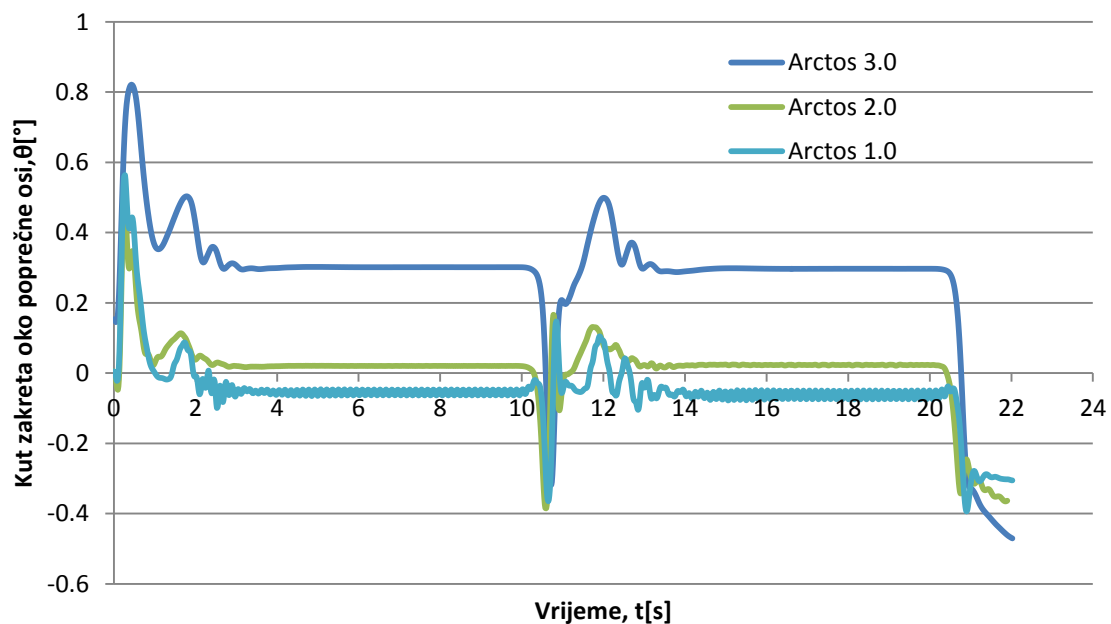
### 7.3. Procedura "Osmica"

"Osmica" je procedura u kojoj se testiraju mogućnosti bolida u prolasku zavoja konstantnog polumjera na ravnoj podlozi. Tom procedurom se ispituju maksimalne mogućnost vozila sa aspekta bočnog ubrzanja pri malim brzinama te se ujedno ispituje stabilnost i upravljivost vozila. Kod ove procedure je bilo zadano da vozač može proći kroz stazu s bočnim ubrzanjem do 1.4g, što su sva tri modela i uspjela. No, postoje razlike u rezultatima. Kao što je već rečeno, veliki utjecaj u ponašanju vozila imaju prigušni elementi, kako u prijašnjim procedurama tako i u ovoj. Na slici 97. je prikazan iznos bočnog ubrzanja pri obavljanju procedure.



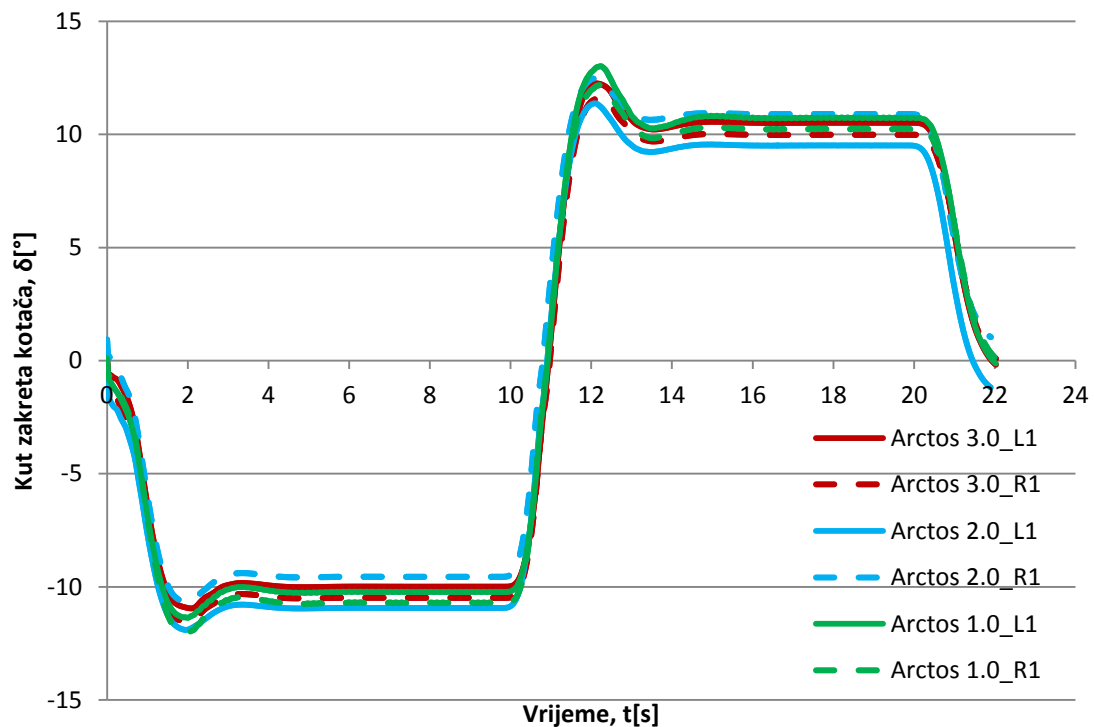
Slika 97. Bočno ubrzanje

Slika 96. prikazuje da modeli Arctos 1.0 i Arctos 2.0 imaju konstantne oscilacije pri obavljanju procedure, točnije da iznos bočnog ubrzanja konstantno oscilira osim pri promjeni smjera u jedanaestoj sekundi. Te oscilacije se ne prikazuju kod modela Arctos 3.0 te on relativno glatko obavlja proceduru što rezultira i kraćem vremenom za završavanje. Karakteristika promjene kuta zakreta oko poprečne osi vozila kod izvođenja ove procedure je prikazana na slici 98.



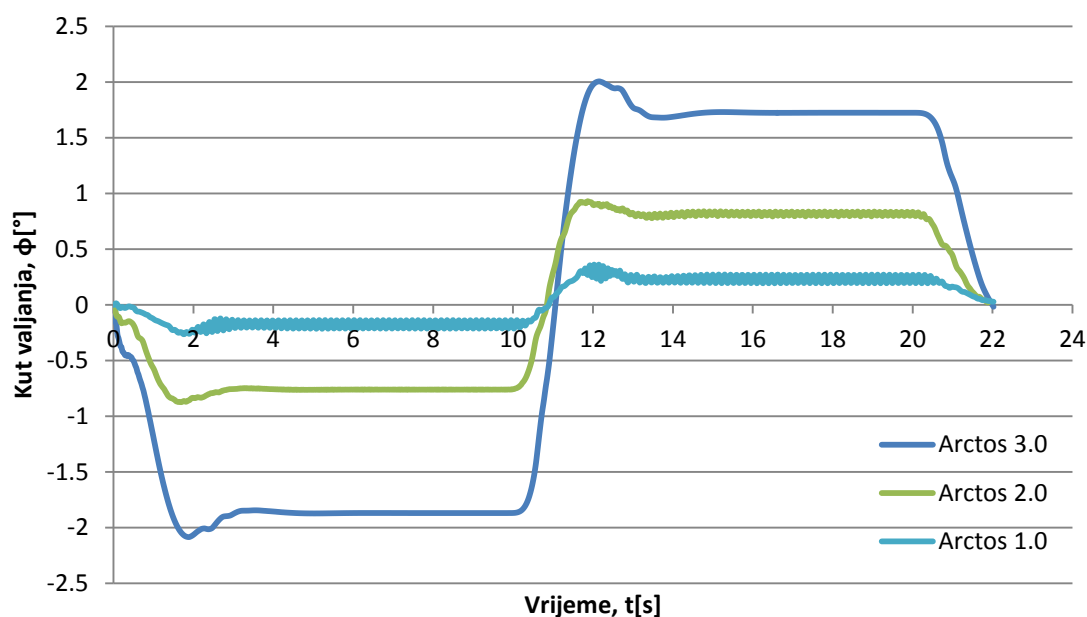
Slika 98. Kut propinjanja

Na slici 98. je moguće vidjeti da model Arctos 1.0 gotovo da i nema promjene poniranja i propinjanja osim pri naglim ubrzanjima i usporavanjima pri ulasku u krug i da ta promjena konstantno oscilira pri odradi procedure. Model Arctos 3.0 i Arctos 2.0 za razliku od ovog prvotnog modela imaju puno bolju reakciju, odnosno postoji promjena koja se javlja pri obavljanju procedure, uzrok tomu je geometrija ovjesa koja omogućava veće uzdužno njihanje, no ukoliko to njihanje ne prijeđe  $2^\circ$  neće doći do kontakta bolida i podloge po kojoj se obavlja procedura. Na slici 99. je prikazana promjena kuta zakreta prednjih kotača sva tri bolida te je vidljivo da se ovisno o zavoju unutarnji kotači kod sva tri bolida zakreću više nego vanjski kotači, što je poželjno, no isto tako je vidljivo da se kotači bolida Arctos 1.0 i Arctos 2.0 moraju zakrenuti više za prijedeni put i isti radijus zavoja što znači da je potreban veći napor vozača kako bi svladao zavoј.



Slika 99. Kut zakretanja kotača

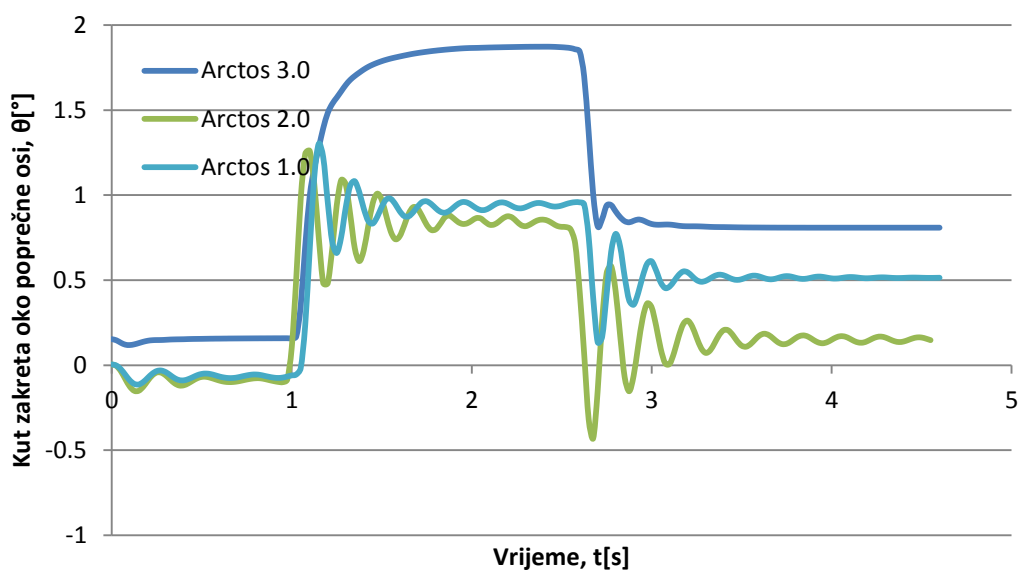
No, napor vozača ovisi o karakteristici letve upravljača, točnije koji je prijenosni omjer u upravljačkom sustavu, te o geometriji ovjesa. Na slici 100. je prikazana karakteristika valjanja bolida za vrijeme izvođenja procedure. Kao što je već rečeno, model Arctos 3.0 ima vrlo nisko postavljenu os valjanja te to rezultira većim njihanjem vozila pri prolasku kroz zavoј, no može se primijetiti da ovaj model prolazi kroz zavoје bez oscilacija, dok se to za druga dva modela, pogotovo Arctos 1.0 ne može reći, jer dolaze do izražaja aktivni prigušni elementi, odnosno njihova karakteristika.



Slika 100. Promjena kuta valjanja

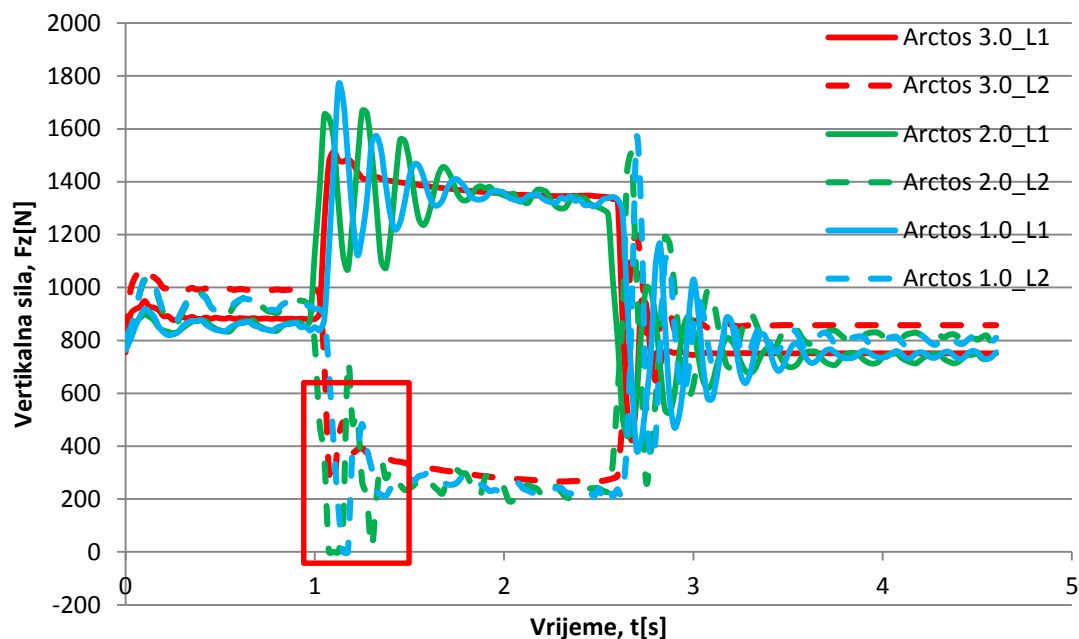
#### 7.4. Procedura "100-0 km/h"

Ova procedura se primjenjuje kod osobnih automobila, no zbog boljeg analiziranja bolida će se iskoristiti u i ovu svrhu. Ovom procedurom ćemo vidjeti koliki je zaustavni put potreban kako bi vozilo stalo pri 100km/h. Razlika između ove procedure i prve spomenute procedure je u sili kočenja, točnije u ovoj proceduri se koristi tlak od 10MPa, dok je kod prve spomenute procedure, "ubrzavanje i usporavanje" tlak 6,5MPa, što je skoro dvostruko manje nego u ovoj proceduri. Na slici 101. je prikazana promjena kuta zakreta oko poprečne osi vozila za vrijeme odvijanja procedure.

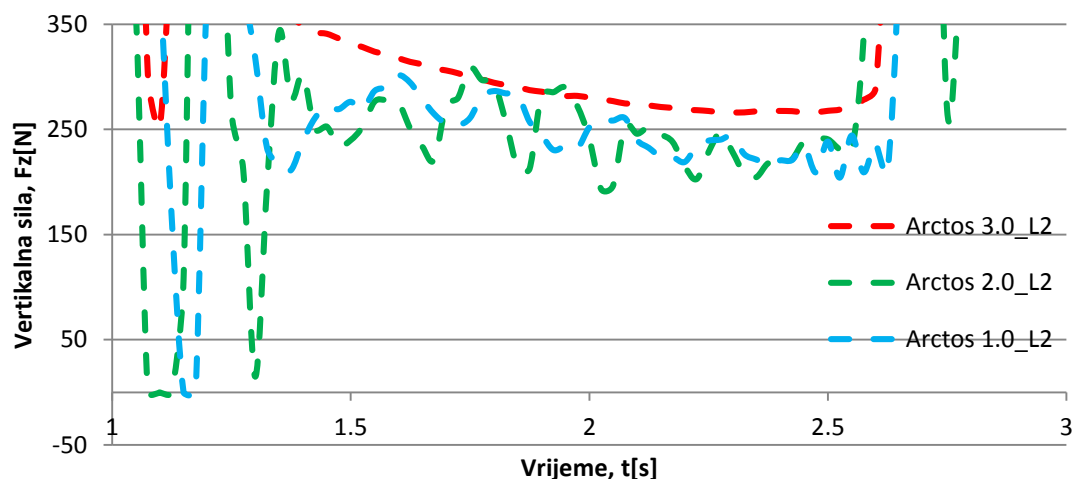


Slika 101. Promjena kuta zakreta oko poprečne osi vozila

Kod modela Arctos 2.0 i Arctos 1.0 je vidljivo osciliranje pri kočenju i pri promjeni kuta s time da model Arctos 3.0 ima najveću promjenu uslijed djelovanja tolikog tlaka u sustavu kočnica. Kao što je već rečeno, ukoliko ta promjena ne bude veća od  $2^\circ$  pri poniranju neće doći do kontakta između tla i bolida. Na slici 102. su prikazane promjene vertikalnih sila uslijed ovako naglog kočenja te se može uočiti da u jednom trenutku dolazi do odvajanja stražnjih kotača uslijed djelovanja tolikog tlaka u kočionom sustavu, slika 103.



Slika 102. Promjena vertikalnih sila



Slika 103. Gubitak kontakta s tlom

## 7.5. Rezultati

U prethodnim poglavljima su prikazane slike sa dijagramima pri izvođenju svake procedure posebno. U tablici 16. su prikazana izlazna vremena pri izvođenju svake procedure zasebno za promijenjene dvije značajke koje se podešavaju na samoj stazi, a one su statički bočni nagib kotača i usmjerenost kotača. U predzadnjem stupcu su navedena izlazna vremena kada nije bilo nikakvih dodatnih podešavanja, odnosno kada su statički bočni nagib kotača i usmjerenost kotača bili postavljeni na vrijednost 0°.

Tablica 16. Rezultati prije i nakon podešavanja značajki

Procedura	Bočni nagib prednjeg kotača, [°]	Usmjerenost prednjeg kotača, [°]	Bočni nagib stražnjeg kotača, [°]	Usmjerenost stražnjeg kotača, [°]	Vrijeme prije izmjene, [s]	Vrijeme nakon izmjene, [s]
Arctos 1.0						
Autokros	-0,5	0,25	-0,5	-0,5	44,075	43,975
Ubrzavanje i usporavanje	-0,5	2,5	-0,5	-2	12,525	12,125
"Osmica"	-0,5	2,5	-0,5	-2	22,075	21,375
100-0 km/h	-0,5	1,5	-0,5	-1,5	4,6	4,375
Arctos 2.0						
Autokros	-0,5	0,5	-0,5	-0,5	44	43,925
Ubrzavanje i usporavanje	-0,5	2,5	-0,5	2	12,48	12,075
"Osmica"	-0,5	-2	-0,5	-2	21,9	21,25
100-0 km/h	-0,5	2,5	-0,5	-2	4,55	4,25
Arctos 3.0						
Autokros	-0,5	0,75	-0,5	-0,5	44,025	43,825
Ubrzavanje i usporavanje	-0,5	3,75	-0,5	-2,25	12,5	12,075
"Osmica"	-0,25	1,25	-0,25	-2,5	22	21,375
100-0 km/h	-0,5	3,75	-0,5	-2,25	4,6	4,25

Usporedbom konačnih vremena nakon podešavanja može se uočiti da razlika iznosi od 0,075 do 0,7 sekundi, ovisno o bolidu i proceduri što je značajan napredak a da se pri tome nisu narušila željena vozna svojstva.

## 8. Zaključak

Trenutni rezultati i karakteristike bolida FSB Racing Team-a pokazali su mnoge nedostatke i mogućnosti unaprijeđenja voznih karakteristika a samim time i rezultata. Izrada postojećeg modela bolida nije testirana u simulacijskim aplikacijama te samim time nisu unaprijed poznate vozne karakteristike bolida. U svrhu poboljšanja bolida je provedena opsežno analiziranje i simulacija.

Koristeći aplikaciju Lotus Suspension Analysis izrašen je model postojećeg bolida sa prikazom kinematskih osobina. Analizom kinematskih osobina modela uočene su mogućnosti za poboljšanje i unaprjeđenje voznih osobina uz konstrukcijske izmjene. Prilikom izrade novog modela bolida i njegove geometrije korištene su upute i prijedlozi iz navedene literature vezane za trkaća vozila, te je bilo potrebno učiniti kompromise u svrhu ostvarivanja željenih i preporučenih zahtjeva kako bi se poboljšale vozne osobine i ostvarili bolji rezultati.

Aplikacijom CarSIM je napravljena simulacija i usporedba oba motela kako bi se ispitala dinamičke mogućnosti vozila. Aplikacija CarSIM omogućava vrlo preciznu analizu vozila u stvarnim uvjetima i korištenje procedura koje se koriste na natjecanju Formule Student.

Provedenom analizom i usporedbom dobiveni rezultati su značajno poboljšani sa aspekta poboljšanja voznih karakteristika do snižavanja vremena potrebnog za odradu procedure. Usporedbom vremena koje je bilo potrebno za odradu procedura bolid je brži od  $0,075 \div 0,7$  sekundi, što je značajno poboljšanje rezultata, a pri tome nije došlo do gubitka željenih i preporučenih karakteristika.

Provedena testiranja i analiza su zapisan u ovome radu ,te mogu poslužiti kao predložak za buduće bolide FSB Racing Team-a.

Korištenjem preporučenih aplikaciju pri analizi i testiranju bolida može se bitno olakšati konstruiranje i testiranje bolida jer su vrlo precizne te se njima na samome početku mogu ostvariti i predvidjeti osobine vozila, te se lako može odlučiti koji model će se koristiti kao krajnji za izradu, a dobiveni podaci se mogu primijeniti u praksi.



## 9.Literatura

- [1] Slika izvođenja testa ;  
[http://www.sae.org/dlymagazineimages/web/516/11016\\_14003.jpg](http://www.sae.org/dlymagazineimages/web/516/11016_14003.jpg); pristupljeno 5.1.2014.
- [2] SAE INTERNATIONAL, FSAE 2014 rules;  
[http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2014\\_fsae\\_rules.pdf](http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2014_fsae_rules.pdf); pristupljeno 5.1.2014.
- [3] Milliken W. F. and Milliken D.L.; Race Car Vehicle Dynamics; Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, Pa.; 1995.
- [4] Uređaj za mjerenje mase vozila:" *Intercomp Racing SW500 E-Z Weigh Cabled Scale Systems*"; <http://www.summitracing.com/parts/icp-170124/overview>; pristupljeno 10.1.2014.
- [5] Trinc, I.; Težište i mjerna nesigurnost, završni rad; FSB Zagreb 2013.
- [6] Karakteristike pneumatika Avon FSAE;  
<http://www.avonmotorsport.com/resource-centre/downloads>; pristupljeno 20.12.2013.
- [7] Reimpell J., Stoll H., Betzler J.W.;The Automotive Chassis-Engineering principles; Butterworth Heinemann, Oxford; 2001.
- [8] Cal Poly FSAE team; Formula SAE Interchangeable Independent Rear Suspension Design; California Polytechnic State University San Luis Obispo; 2009.
- [9] Blundell M., Harty D.; A Multibody System Approach to Vehicle Dynamics; Society of Automotive Engineers, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford; 2004.
- [10] Eric Klang; Suspension design case study;  
<http://www.mae.ncsu.edu/klang/courses/mae442/Motor%20Sports/3%20Case%20Study%20Continued.ppt>. ; NC State University; 2005.
- [11] Matej Dominković; Diplomski rad: Utjecaj karakteristike i pozicije amortizera/opruge na ponašanje vozila FSB Arctos; FSB Zagreb 2014

## **PRILOZI**

I. Proračun težišta bolidu Formule student

II. CD-R

## ***Proračun težišta vozila***

Proračun težišta vozila

Težina prednjeg lijevog kotača:

$$g := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$m_1 := 61\text{kg}$$

$$m_2 := 44.5\text{kg}$$

$$m_3 := 62.5\text{kg}$$

$$m_4 := 72.5\text{kg}$$

$$m_{\text{uk}} := m_1 + m_2 + m_3 + m_4$$

$$m_{\text{uk}} = 240.5\text{kg}$$

$$W_1 := m_1 \cdot g$$

$$W_1 = 598.41\text{N}$$

Težina prednjeg desnog kotača:

$$W_2 := m_2 \cdot g$$

$$W_2 = 436.545\text{N}$$

Ukupna težina prednjeg dijela:

$$W_F := W_1 + W_2$$

$$W_F = 1.035 \times 10^3 \text{ N}$$

Težina stražnjeg lijevog kotača:

$$W_3 := m_3 \cdot g$$

$$W_3 = 613.125\text{N}$$

Težina stražnjeg desnog kotača:

$$W_4 := m_4 \cdot g$$

$$W_4 = 711.225\text{N}$$

Ukupna težina stražnjeg dijela:

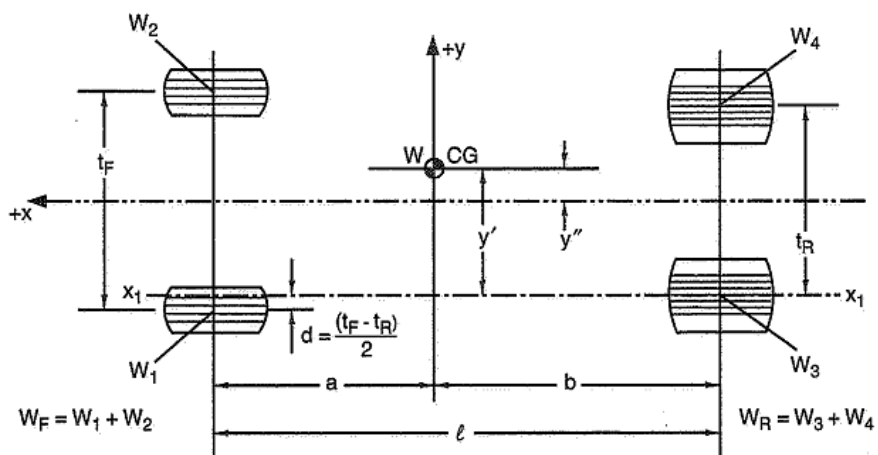
$$W_R := W_3 + W_4$$

$$W_R = 1.324 \times 10^3 \text{ N}$$

Ukupna težina vozila:

$$W := W_F + W_R$$

$$W = 2250 \cdot 10^3 \text{ N}$$



Određivanje horizontalne udaljenosti tež ish ta vozila

Međuosovinski razmak

$$l := 1600 \text{ mm}$$

$$b := \frac{W_F \cdot l}{W}$$

$$b = 701.871 \text{ mm}$$

$$a := l - b$$

$$a = 898.129 \text{ mm}$$

Trag prednjeg kotač a:

$$t_F := 1310 \text{ mm}$$

Trag straž njeg kotač a:

$$t_R := 1250 \text{ mm}$$

Razlika u tragovima kotač a:

$$d := \frac{(t_F - t_R)}{2}$$

$$d = 30 \text{ mm}$$

Udaljenost od ruba vozila:

$$y_1 := \frac{W_2}{W}(t_F - d) - \frac{W_1}{W} \cdot (d) + \frac{W_4 \cdot t_R}{W}$$

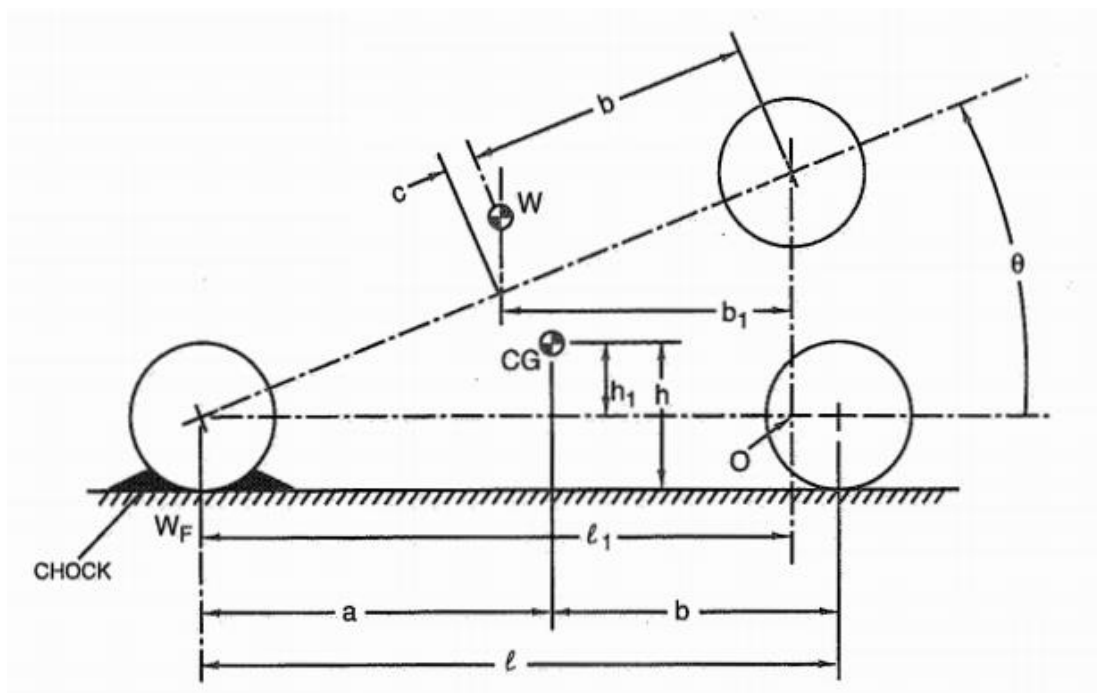
$$y_1 = 606.05 \text{ mm}$$

Udaljenost od središta vozila

$$y_2 := \frac{W_2}{W}(t_F - d) - \frac{W_1}{W}(d) + \frac{W_4 \cdot t_R}{W} - \frac{t_R}{2}$$

$$y_2 = -18.95 \text{ mm}$$

Proračun vertikalne visine težišta:



Težište prednjeg nagnutog dijela:

$$W_{F1} := 106.5 \text{ kg} \cdot g$$

$$W_{F1} = 1.045 \times 10^3 \text{ N}$$

Kut nagiba vozila:

$$\theta := \frac{6.2793\pi}{180}$$

Horizontalna udaljenost podignutog stražnjeg kotača a:

$$l_1 := l \cdot \cos(\theta)$$

$$l_1 = 1.59 \times 10^3 \cdot \text{mm}$$

Dijagonalna udaljenost stražnjeg podignutog kotača a od težišta:

$$b_1 := \left( \frac{W_{F1}}{W} \right) \cdot l_1$$

$$b_1 = 704.273 \text{ mm}$$

$$c := \left( \frac{W_{F1}}{W} \cdot l \right) - b$$

$$c = 6.653 \text{ mm}$$

Visina težišta od centra vozila:

$$h_1 := \frac{W_{F1} \cdot l - W \cdot b}{W \cdot \tan(\theta)}$$

$$h_1 = 60.461 \text{ mm}$$

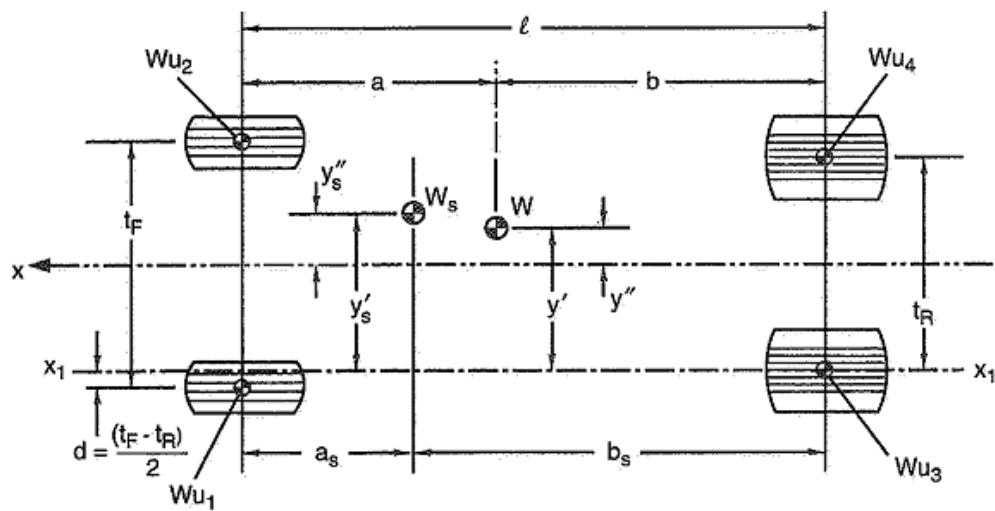
Ukupna visina težišta:

$$R_L := 260 \text{ mm}$$

$$h := h_1 + R_L$$

$$h = 320.461 \text{ mm}$$

Proračun težišta za obje mase:



$$W_{U1} := 13\text{kg} \cdot g$$

$$W_{U1} = 127.53\text{N}$$

$$W_{U2} := 13\text{kg} \cdot g$$

$$\overline{W_{U2}} = 127.53\text{N}$$

$$W_{U3} := 14\text{kg} \cdot g$$

$$W_{U3} = 137.34\text{N}$$

$$W_{U4} := 14\text{kg} \cdot g$$

$$W_{U4} = 137.34\text{N}$$

Prednja neovješ ena tež ina:

$$W_{UF} := 26\text{kg} \cdot g$$

$$W_{UF} = 255.06\text{N}$$

Straž nja neovješ ena tež ina:

$$W_{UR} := 28\text{kg} \cdot g$$

$$W_{UR} = 274.68\text{N}$$

Ovješ ena tež ina:

$$W_S := W - W_{UF} - W_{UR}$$

$$W_S = 1.83 \times 10^3 \text{ N}$$



$$b_S := \frac{W \cdot b - W_{UF} \cdot l}{W_S}$$

$$b_S = 682.038 \text{ mm}$$

$$a_S := l - b_S$$

$$a_S = 917.962 \text{ mm}$$

Boč na pozicija tež iš ta ovješ ene tež ine:

$$y_{S1} := \frac{W}{W_S} \cdot y_1 - \frac{W_{U4}}{W_S} \cdot t_R - \frac{W_{U2}}{W_S} (t_F - d) + \frac{W_{U1}}{W_S} \cdot d$$

$$y_{S1} = 600.563 \text{ mm}$$

$$y_{S2} := y_{S1} - \frac{t_R}{2}$$

$$y_{S2} = -24.437 \text{ mm}$$

$$h_S := \frac{W}{W_S} \cdot h - \frac{W_{UF}}{W_S} \cdot R_L - \frac{W_{UR}}{W_S} \cdot R_L$$

$$h_S = 337.967 \text{ mm}$$

$$W_{R1} := 136 \text{ kg} \cdot g$$

$$W_{R1} = 1.334 \times 10^3 \text{ N}$$

$$a_1 := \left( \frac{W_{R1}}{W} \right) \cdot l \cdot \cos(\theta)$$

$$a_1 = 899.353 \text{ mm}$$

$$h_{1R} := \frac{W_{R1} \cdot l - (W) \cdot a}{W \cdot \tan(\theta)}$$

$$h_{1R} = 60.461 \text{ mm}$$

$$h_R := R_L + h_{1R}$$

$$h_R = 320.461 \text{ mm}$$

